

รหัสโครงการ [SUT-7-710-51-24-33]



รายงานการวิจัย

การศึกษาการใช้เส้นไหมแบบต่อเนื่องสำหรับเสริมแรง
วัสดุเชิงประกอบอีพอกซี
(Study of Using Silk as a Continuous Fiber for Reinforcing
Epoxy Composite)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การศึกษาการใช้เส้นไหมแบบต่อเนื่องสำหรับเสริมแรง วัสดุเชิงประกอบอีพอกซี (Study of Using Silk as a Continuous Fiber for Reinforcing Epoxy Composite)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์
สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิธินาถ ศุภกาญจน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุกาพร รักสกุลพิวัฒน์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2551-2552

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มีนาคม/2555

กิตติกรรมประกาศ

ในการดำเนินการวิจัยโครงการ “การศึกษาการใช้เส้นไหมแบบต่อเนื่องสำหรับเสริมแรงวัสดุเชิงประกอบอีพอกซี” คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สภาวิจัยแห่งชาติ ผู้สนับสนุนทุนวิจัย (ปีงบประมาณ 2551-52) และ ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการสนับสนุนการดำเนินงานของโครงการวิจัย และ ศูนย์หม่อนไหม นครราชสีมา สำหรับเครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึงของเส้นไหม นอกจากนี้ใคร่ขอขอบคุณ Mettler-Toledo (Thailand) Co. Ltd. สำหรับการใช้เครื่องมือสมบัติทางความร้อน



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้ผืนผ้าไหมเป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับวัสดุเชิงประกอบอีพอกซี ผืนผ้าไหมที่ใช้มีรูปแบบเป็นผืนผ้าทอหลายหนึ่ง (plain weaving) ใช้เส้นไหมสายพันธันางน้อย ผืนผ้าไหมถูกเตรียมในสองลักษณะคือ ผืนผ้าไหมที่ไม่ผ่านการดัดแปร และผืนผ้าไหมที่ดัดแปรด้วยสารคู่ควบ 3-อมีโนโพรพิลไตรเอทอทอกซีไซเลน การเตรียมวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีใช้ผืนผ้าไหมในปริมาณร้อยละ 18 30 และ 35 สมบัติทางความร้อนของผืนผ้าไหมและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผืนผ้าไหมถูกตรวจสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อนและเทคนิคการวิเคราะห์พลังงานภายใต้ความร้อน สมบัติทางกลของผืนผ้าไหมและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผืนผ้าไหมถูกตรวจสอบด้วยเครื่อง universal testing machine หมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวของผืนผ้าไหมถูกตรวจสอบด้วยเทคนิค เอทีอาร์ฟูเรียร์ทรานซฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคปี ลักษณะพื้นผิวของเส้นไหมและพื้นผิวแตกหักของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผืนผ้าไหมมีจำนวนเส้นด้ายเฉลี่ยในแนวเส้นยืน (warp direction) 177 เส้นต่อ 10 เซนติเมตร และในแนวเส้นพุ่ง (weft direction) 201 เส้นต่อ 10 เซนติเมตร ความทนต่อแรงดึงในแนวเส้นยืน 537 นิวตัน และในแนวเส้นพุ่ง 555 นิวตัน จากการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของผืนผ้าไหมประกอบด้วยเฟสอสซิลิโคนและเฟสฟลิก ผืนผ้าไหมมีปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ผืนผ้าไหมที่ไม่ผ่านการดัดแปรเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 324 องศาเซลเซียส การดัดแปรพื้นผิวผ้าไหมด้วยสารคู่ควบไซเลนทำให้ผืนผ้าไหมที่ผ่านการดัดแปรด้วยสารคู่ควบไซเลนเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 340 องศาเซลเซียส และเมื่อตรวจสอบด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าเส้นไหมของผืนผ้าไหมที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีพื้นผิวที่ราบเรียบ ในขณะที่เส้นไหมของผืนผ้าไหมที่ผ่านการดัดแปรมีสารเคลือบอยู่ที่พื้นผิวคาดว่าเป็นชั้นของสารคู่ควบไซเลน

การเสริมแรงอีพอกซีเรซินด้วยผืนผ้าไหมทำให้โมดูลัสของยังก์และโมดูลัสแรงดัดของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผืนผ้าไหม อย่างไรก็ตามความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงดัด และความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีน้อยกว่าสมบัติทางกลดังกล่าวของอีพอกซีเรซิน แต่การเพิ่มปริมาณผืนผ้าไหมทำให้ ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงดัด และความทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการเสื่อมสลายเนื่องจากความร้อนของอีพอกซีเมทริกซ์ไม่ขึ้นกับปริมาณผืนผ้าไหมแต่วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยผืนผ้าไหมจะเริ่มเสื่อมสลายที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเสื่อมสลายของอีพอกซี และอุณหภูมิการเกิดโครงสร้างร่างแหของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเพิ่มขึ้นแต่อุณหภูมิการเกิดทรานซิชันแก้วหลังอบบ่มลดลงเมื่อปริมาณผืนผ้าไหมเพิ่มขึ้น

การดัดแปรผืนผ้าไหมด้วยสารคู่ควบ APTS มีผลต่อการปรับปรุงความทนต่อแรงดึง และความทนต่อแรงกระแทกเล็กน้อย และมีผลต่อการเพิ่มขึ้นต่ออุณหภูมิเริ่มต้นของการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีอย่างมีนัยสำคัญ

Abstract

In this research project, silk fabric reinforced epoxy composites were prepared with untreated silk fabric (UT-SF) and silane treated silk fabric (ST-SF). The silk fabric was plain woven using silk tread of *Nang Noi* eco type. 3-Aminopropyltriethoxysilane, a silane coupling agent, was used for the silk fabric treatment. The epoxy composite was prepared with silk weight fraction of 0.18, 0.30, and 0.35. Thermal properties of silk fabrics and silk reinforced epoxy composites were investigated using a thermogravimetric analyzer and differential scanning calorimetry. Mechanical properties of the fabrics and epoxy composites were determined using a universal testing machine. Attenuated reflection Fourier transform infrared spectrometry was employed to characterize silk surface functional group. Topography of silk surface and morphology of the composite fracture surface were observed by a scanning electron microscope.

Silk fabric contained in warp direction 177 ends/10 cm. and in weft direction 201 picks/10 cm. Tensile force of untreated silk fabric was 537 N in warp direction and 555 N in weft direction. After the silane treatment, it was 814 N and 828 N, respectively. Silk fabrics contained 7 wt% moisture. UT-SF thermally decomposed at 324°C however; silane treatment resulted in higher thermal decomposition of ST-SF, 340 °C. In addition, silk tread of UT-SF had smooth surface whereas that of ST-SF had rougher surface due to deposited silane layer on the surface. It was evident by functional group analysis that silk comprised amorphous and crystalline phase.

Young's modulus and flexural modulus of epoxy composites was a function of silk fabric composition. Nevertheless, reinforcing epoxy with silk fabric caused the reduction in composite tensile strength, flexural strength and impact strength. As silk fraction was increased, the composite strengths, tensile, flexural, and impact strength, improved. Thermal decomposition of epoxy matrix was not influenced by types of fabric whether it was UT-SF or ST-SF. However, the epoxy composites initially decomposed at lower temperature derived from silk decomposition occurring at temperature lower than that of epoxy matrix. For epoxy reinforced with silk fabric, it cured at higher temperature than neat epoxy did but its glass transition temperature was lower than the neat epoxy's.

Treating a silk fabric with 3-aminopropyltriethoxysilane resulted in a gradual increase of tensile and impact strength of epoxy composite. The initial temperature for the epoxy composite to decompose was significantly improved when the composite was reinforced with ST-SF.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
Abstract	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
สารบัญแผนภาพ	ฌ
คำอธิบายคำย่อที่ใช้ในการวิจัย	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์หรือเป้าหมายของโครงการวิจัย	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ทฤษฎีหรือกรอบแนวความคิด	2
1.5 การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย	4
เอกสารอ้างอิง	5
บทที่ 2	7
2.1 ขอบเขตการวิจัย	7
2.2 การทดลอง	7
2.2.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี	7
2.2.2 การเตรียมผืนผ้าไหมแบบไม่ผ่านการแปร (Untreated – Silk Fabric, UT-SF)	7
2.2.3 การเตรียมผืนผ้าไหมที่ปรับสภาพด้วยสารคู่ควบไซเลน (Silane - Treated Silk Fabric, ST-SF)	7
2.2.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของผืนผ้าไหม	7
2.2.4.1 การทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile Test)	7
2.2.4.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน	8
2.2.4.3 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันเคมี (Chemical Functional Group)	8
2.2.4.4 การวิเคราะห์ปริมาณซิลิกาของผืนผ้าไหม	8
2.2.4.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา	8
2.3 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของผืนผ้าไหม	8
2.3.1 ความทนต่อแรงดึงของผืนผ้าไหม	8
2.3.2 สมบัติทางความร้อนของผืนผ้าไหม	9
2.3.3 หมู่ฟังก์ชันเคมีและโครงสร้างของเส้นไหม	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นไหม.....	12
2.4 สรุปผลการศึกษา.....	13
เอกสารอ้างอิง.....	14
บทที่ 3 การศึกษาสมบัติของอีพอกซีเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นไหม.....	15
3.1 ขอบเขตการวิจัย.....	15
3.2 การทดลอง.....	15
3.2.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	15
3.2.2 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นไหม.....	15
3.2.3 การทดสอบสมบัติอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นไหม.....	16
3.2.3.1 การทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile Test).....	16
3.2.3.2 การทดสอบความทนต่อแรงดัด (Flexural Test).....	16
3.2.3.3 การทดสอบความทนต่อแรงตกกระแทก (Impact Test).....	16
3.2.3.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีและเส้นไหม.....	16
3.2.3.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา.....	16
3.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	16
3.3.1 สมบัติทางกลของอีพอกซีและวัสดุอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นไหม.....	16
3.3.2 สมบัติทางความร้อนของอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นไหม.....	23
3.3.3 สัณฐานวิทยาของอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นไหม.....	29
3.3.3.1 พื้นผิวแตกหัก (Fracture Surface).....	29
3.3.3.2 การยึดติดระหว่างพื้นผิวของเส้นไหมและอีพอกซีเมทริกซ์.....	32
3.4 สรุปผลการศึกษา.....	34
เอกสารอ้างอิง.....	35
ประวัติคณะผู้วิจัย.....	36
ผลงานเผยแพร่ของโครงการวิจัย.....	37

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติความทนต่อแรงดึงและการยืดตัวก่อนขาดของผืนผ้าไหมแบบ ST-SF และ UT-SF	8
2.2 ปริมาณซิลิกา (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) จากเถ้าที่ได้จากการเผาผืนผ้าไหม UT-SF และ ST-SF.....	12
3.1 สมบัติความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงดัด และ ความทนต่อแรงกระแทกของอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF.....	22
3.2 อุณหภูมิการเกิดโครงสร้างร่างแห (T_{cure}) และ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (T_g) ของอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF.....	26



สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	กราฟ DSC thermogram ของผืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ ST-SF 9
2.2	กราฟ TGA (a) และ DTGA (b) ของผืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ ST-SF 10
2.3	ATR FTIR spectrum ของผืนผ้าไหม UT-SF 11
2.4	SEM micrographs ของเส้นไหม UT-SF (a, b, c) และ ST-SF (d, e, f) 12
3.1	กราฟระหว่างค่ามอดุลัสของยังก์ (Young's modulus) และสัดส่วนโดยมวลของผืนผ้าไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF 17
3.2	กราฟระหว่างค่าการยืดออกก่อนขาด (elongation at break) และสัดส่วนโดยมวลของผืนผ้าไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF 17
3.3	กราฟระหว่างความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และสัดส่วนโดยมวลของผืนผ้าไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยผืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF 18
3.4	กราฟระหว่างความทนต่อแรงกระแทก (impact strength) และสัดส่วนโดยมวลของผืนผ้าไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF 19
3.5	กราฟระหว่างมอดุลัสแรงดัด (flexural modulus) และสัดส่วนโดยมวลของผืนผ้าไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยผืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF 20
3.6	กราฟระหว่างความทนต่อแรงดัด (flexural strength) และสัดส่วนโดยมวลของผืนผ้าไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF 21
3.7	กราฟ TGA (a) และ DTGA (b) ของผืนผ้าไหมแบบ UT-SF, อีพอกซี และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผืนผ้าไหมแบบ UT-SF 24
3.8	กราฟ TGA (a) และ DTGA (b) ของ UT-SF, อีพอกซี และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยผืนผ้าไหมแบบ UT-SF 25
3.9	กราฟ DSC thermogram ของ อีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผืนผ้าไหมแบบ UT-SF ก่อนการอบบ่ม 27
3.10	กราฟ DSC thermogram ของ อีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผืนผ้าไหมแบบ UT-SF ที่ผ่านการอบบ่ม 27
3.11	กราฟ DSC ของ อีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยผืนผ้าไหมแบบ ST-SF ก่อนการอบบ่ม 28

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 กราฟ DSC ของ อีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นผ้าไหมแบบ ST-SF ที่ผ่านการอบบ่ม.....	28
3.13 SEM micrographs ของอีพอกซี (a) และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นผ้าไหมแบบ UT-SF ที่สกัดส่วนโดยน้ำหนัก UT-SF 0.18 (b) และ 0.30 (c) จากชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความทนต่อแรงดัด	30
3.14 SEM micrographs ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นผ้าไหมแบบ ST-SF ที่สกัดส่วนโดยน้ำหนัก ST-SF 0.18 (a), 0.30 (b) และ ST-SF 0.35 (c)	31
3.15 SEM micrographs ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นผ้าไหม UT-SF ที่สกัดส่วนโดยน้ำหนัก 0.18 (a, b, c) และ วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นผ้าไหม ST-SF ที่สกัดส่วนโดยน้ำหนัก 0.18 (d, e, f).....	33



สารบัญแผนภาพ

แผนภาพที่	หน้า
2.1 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวเส้นไหมและสารประสาน APTES.....	12
3.1 ปฏิกิริยาระหว่างวงแหวนอีพอกไซด์ของอีพอกซีเรซินกับหมู่เอมีนของสารประสาน APTES	21



คำอธิบายคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

ATR	Attenuated Reflection
DTGA	Differential Thermogravimetric Analysis
FTIR	Fourier Transform Infrared
HDT	Heat Deflection Temperature
SEM	Scanning Electron Microscope
ST-SF	Silane Treated Silk Fabric
TGA	Thermogravimetric Analysis
UT-SF	Untreated Silk Fabric



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เส้นใยไหมเป็นผลิตภัณฑ์ธรรมชาติที่หาได้ง่ายภายในประเทศ ในประเทศไทยมีการนำเส้นใยไหมที่ได้จากตัวไหมมาทอเป็นผ้าไหม ผ้าไหมเป็นผ้าที่มีคุณภาพสูง ทั้งทางด้านความสวยงาม ความทนทาน และความสบายในการสวมใส่ เส้นใยไหมเป็นเส้นใยที่มีสมบัติทางกลที่ดี คือ มีค่ามอดุลัสแรงดึงและความทนต่อแรงดึง (tensile strength) สูง และสามารถยืดได้ 20% ก่อนขาด (elongation at break) ซึ่งเส้นใยสังเคราะห์เช่น Kevlar 49 และ เส้นใยแก้ว ซึ่งเป็นวัสดุเสริมแรงที่ใช้กันแพร่หลาย แม้จะมีความทนต่อแรงดึงสูงกว่าเส้นใยไหมแต่สามารถยืดได้น้อยกว่า 5% ก่อนขาดออกจากกัน [1]

ดังนั้นเส้นใยไหมสามารถใช้เป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตได้เนื่องจากมีความแข็งแรงทางกลสูง และในขณะเดียวกันจะช่วยเพิ่มความเหนียวให้กับวัสดุคอมพอสิตเนื่องจากความสามารถในการยืดก่อนจะขาดออกจากกัน จึงเหมาะสำหรับวัสดุเสริมแรงที่ต้องการความเหนียวเป็นพิเศษ

ข้อดีของการใช้เส้นใยไหมเป็นวัสดุเสริมแรงคือ

1. เพิ่มประโยชน์ใช้สอยของเส้นใยไหมซึ่งเป็นวัสดุภายในประเทศ
2. เป็นการพัฒนาวัสดุคอมพอสิตชนิดใหม่ที่มีความเหนียวเป็นพิเศษ
3. เพิ่มความสามารถในการย่อยสลายของวัสดุคอมพอสิตเนื่องจากเส้นใยไหมเป็นวัสดุธรรมชาติ สามารถย่อยสลายได้ตามกระบวนการชีวภาพ
4. เส้นใยไหมไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์อื่น ๆ เช่นเส้นใยแก้ว
5. เป็นการลดการใช้พลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ และ ลดของเสียจากกระบวนการผลิตเส้นใยสังเคราะห์

วัสดุคอมพอสิตที่ใช้แพร่หลายในงานทางด้านวัสดุวิศวกรรมคือ วัสดุคอมพอสิตอีพอกซี คุณสมบัติของอีพอกซีเรซินที่ผ่านกระบวนการทำให้แข็งตัวแล้วคือ แข็งและเปราะ (hard and brittle) การใช้เส้นใยไหมเป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับวัสดุคอมพอสิตอีพอกซีจะช่วยปรับปรุงความเหนียวให้กับวัสดุชนิดนี้ งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้เส้นใยไหมเป็นวัสดุเสริมแรงกำจัดวงเฉพาะวัสดุคอมพอสิตยาง (elastomer composites) [2-5] งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เส้นใยไหมในวัสดุคอมพอสิตอีพอกซีมีอยู่น้อย จึงควรมีการศึกษาการใช้เส้นใยไหมเป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับวัสดุคอมพอสิตอีพอกซี (epoxy composites) ซึ่งจะนำไปสู่การได้วัสดุคอมพอสิตอีพอกซีชนิดใหม่ที่ใช้เส้นใยไหมเป็นวัสดุเสริมแรงที่สามารถใช้เป็นวัสดุวิศวกรรมในงานที่ต้องการความเหนียวเป็นพิเศษ

1.2 วัตถุประสงค์หรือเป้าหมายของโครงการวิจัย

- เพื่อให้ได้วัสดุคอมพอสิตอีพอกซีที่ใช้เส้นใยไหมแบบต่อเนื่องเป็นวัสดุเสริมแรง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไปสำหรับเตรียมวัสดุคอมพอสิตของอีพอกซีซึ่งใช้เส้นใยไหมเป็นวัสดุเสริมแรง และเป็นการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุของประเทศอย่างต่อเนื่อง
- เพื่อนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ของวัสดุคอมพอสิตอีพอกซีที่มีความเหนียวที่ดี
- เป็นประโยชน์ต่อกลุ่มอุตสาหกรรมวัสดุคอมพอสิตและเกษตรกรผู้ปลูกหม่อนเลี้ยงไหม
- เป็นการพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ให้สามารถเริ่มการวิจัยและพัฒนาได้ และดำเนินการวิจัยต่อไปได้อย่างต่อเนื่องในระยะยาว

หน่วยงานที่จะนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

- ผู้ประกอบการกลุ่มอุตสาหกรรมวัสดุคอมพอสิตอีพอกซี
- ผู้ประกอบการและเกษตรกรผู้เลี้ยงไหม
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.4 ทฤษฎีหรือกรอบแนวคิด

จากการศึกษาความแข็งแรงทางกลของเส้นใยไหมของญี่ปุ่น (Diazo, J106, J115) จีน (C108, C145) และอินเดีย (Hosa mysore, kalimpong A, NB18, NB7, Nistari) พบว่าเส้นไหมมีความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ระหว่าง 65-171 MPa และสามารถยืดออก 20-40% ก่อนขาด [6] และ Bascom ได้รายงานความแข็งแรงทางกลของเส้นใยไหมจากตัวไหมชนิด *Bombyx. Mori* คือ *Bombyx. Mori* มีความทนทานต่อแรงดึงสูงถึง 0.6 GPa, ความสามารถในการยืดออกก่อนขาด 20% 1 และยังมีมอดูลัส 5 GPa [7] ซึ่งเป็นความแข็งแรงที่เหมาะสมในการใช้งานทางด้านวัสดุวิศวกรรมโดยมีสมบัติเด่นคือจะให้ความเหนียวที่ดีกว่าการใช้เส้นใยสังเคราะห์อื่น เช่น Kevlar 49 และ เส้นใยแก้ว เส้นไหมจึงน่าจะเป็นวัสดุเสริมแรงที่ดีชนิดหนึ่งสำหรับวัสดุคอมพอสิตอีพอกซี และเส้นไหมน่าจะช่วยปรับปรุงความเหนียวของวัสดุคอมพอสิตอีพอกซีได้อีกประการหนึ่ง

โครงสร้างของเส้นใยไหมมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) และหมู่เอไมด์เป็นองค์ประกอบ หมู่ไฮดรอกซิลและหมู่เอไมด์จะมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงในการยึดติดที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยไหมกับอีพอกซีเรซินผ่านทางพันธะไฮโดรเจน ซึ่งความแข็งแรงในการยึดติดที่ผิวสัมผัสจะส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุคอมพอสิต โดยการยึดติดที่ดีจะช่วยปรับปรุงกลไกการถ่ายเทความเค้น (stress transfer) ระหว่างอีพอกซีและเส้นใยซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเพิ่มความเหนียวของวัสดุคอมพอสิต

การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยไหมด้วยสารคู่ควาไซเลนได้เช่นเดียวกัน สารประกอบไซเลนนี้จะต้องมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดพันธะเคมีกับพลาสติกได้ เช่นหมู่เอมีน (-NH₂) สามารถทำปฏิกิริยากับวงแหวนอีพอกไซด์ของอีพอกซีเรซินเกิดเป็นพันธะเคมีในลักษณะเดียวกับสารเร่งการแข็งตัวของอีพอกซีเรซิน ทำ ปฏิกิริยากับอีพอกซีเรซิน ซึ่งพันธะเคมีที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยไหมและอีพอกซีเรซินมีความแข็งแรงมากกว่าพันธะไฮโดรเจน เป็นการเพิ่มเสถียรภาพสูงสุดให้กับโครงสร้างเคมี ณ ผิวสัมผัส (interfacial structure) ซึ่งมีผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุคอมพอสิตอีพอกซี

งานวิจัยของผู้วิจัยที่ใช้เส้นไหมแบบสั้นและแบบต่อเนื่อง (continuous silk) เป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับอีพอกซีเรซิน พบว่าการใช้เส้นไหมแบบต่อเนื่องและ/หรือเส้นไหมแบบต่อเนื่องที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยตัวทำละลายในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะช่วยปรับปรุงความทนต่อแรงกระแทกของอีพอกซีได้ในระดับหนึ่ง [8] แต่งานวิจัยดังกล่าวเป็นการวิจัยเบื้องต้นยังไม่ครอบคลุมถึงปริมาณที่เหมาะสมของเส้นไหมสำหรับเสริมแรงวัสดุคอมพอสิตอีพอกซี ดังนั้นในงานวิจัยที่จะทำในขั้นต่อไปคือเป็นการหาปริมาณที่เหมาะสมของเส้นไหมแบบต่อเนื่องสำหรับเสริมแรงวัสดุคอมพอสิตอีพอกซี และเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุคอมพอสิตที่ได้ระหว่างเส้นไหมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพเส้นไหมด้วยสารคู่ควบไซเลน

1.5 การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาโครงสร้างของเส้นใยไหมประเภทต่าง ๆ ได้มีการวิจัยอย่างกว้างขวาง [7-18] พบว่าโครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยไหมซึ่งเป็นเส้นใยโปรตีนประกอบด้วยส่วนที่เป็น structural protein ของไฟโบรอิน และส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมโยงเส้นใยเข้าด้วยกันคือ เซเรซิน กรดอมิโนที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยไหมได้แก่ ไกลซีน (glycine) อลานีน (alanine) และเซอรีน (serine) เป็นต้น สันฐานวิทยาของเส้นใยไหมประกอบด้วยส่วนที่เป็นระเบียบ (crystalline) และส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ (amorphous) ซึ่งมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงทางกลของเส้นใยไหม โดยที่โครงสร้างส่วนที่เป็นระเบียบจะมีผลต่อความแข็ง (stiffness) และ โครงสร้างส่วนที่ไม่เป็นระเบียบมีผลต่อความสามารถในการยืดออกก่อนขาด [19]

การศึกษากการดัดแปรไหม *Bombyx mori* ด้วยความร้อน (thermal treatment) พบว่าการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเคมีเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 190 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิประมาณ 280 องศาเซลเซียสเกิดการขาดออกของสายโซ่หลัก (main chain) และที่อุณหภูมิประมาณ 308 องศาเซลเซียส หมู่ไฮดรอกซิลจะหลุดออกจากโครงสร้าง [20]

สำหรับการศึกษาสมบัติทางความร้อนของเส้นไหม *Antheraea pernyi* (wild-type silkworm) ที่อยู่ในรูปฟิล์มไฟโบรอิน (fibroin film) ที่ผ่านการทรีทเมนต์ด้วยสารละลายเมทานอล (80 เปอร์เซ็นต์) พบว่าสมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มขึ้นกับระยะเวลาการทรีทเมนต์และเมื่อเวลาการทรีทเมนต์เป็น 60 นาที พฤติกรรมการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของแผ่นฟิล์มไม่แตกต่างจากแผ่นฟิล์มที่ไม่ผ่านการทรีทเมนต์ [21]

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอได้มีการใช้ ไวนิลมอโนเมอร์ เช่น เมทาอะคริลาไมด์ (methacrylamide) เมทิลเมทาคริเลต (methyl methacrylate) และ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-hydroxyethyl methacrylate) ใช้สำหรับปรับปรุงสมบัติเส้นไหม เพื่อเพิ่มความเสถียรในกระบวนการทอ เช่น ลดกระแสไฟฟ้าสถิตย์ของเส้นไหม หรือเพิ่มความสบายในการสวมใส่ หรือขลอการเสื่อมสภาพของเส้นใยไหม ซึ่ง Ishicawa และคณะ [22] ประสบความสำเร็จในการกราฟ (grafting) ไวนิลมอโนเมอร์ ชนิด ไวนิลไตรเมทอกซีไซเลน (ใช้เป็นสารคู่ควบในอุตสาหกรรมวัสดุคอมพอสิต [23]) บนโครงสร้างของเส้นใยไหมชนิด *Bombyx mori*

ได้มีการศึกษาทาง micro-mechanic เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างพื้นผิวของเส้นไหมจากตัวไหมชนิด *Bombyx Mori* และอีพอกซีเรซิน โดยวิธี microbond test และพบว่า interfacial shear strength มีค่าเท่ากับ 15 MPa [24]

ระยะ 2 ปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาใช้เส้นไหมในวัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์ ได้แก่ การใช้เป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับพอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต (poly (butylene succinate)) เพื่อใช้เป็นวัสดุคอมพอสิตทาง

ชีวภาพ (biocomposites) โดยศึกษาผลของปริมาณเส้นไหมเส้นสั้นต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อน [25] และ ได้มีการศึกษาการใช้ผ้าไหมใช้แล้ว (waste silk fabric) เป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับอีพอกซีที่ทำให้เหนียวด้วย อีพอกซี-ฟีนอล-น้ำมันเมล็ดเปลือกมะม่วงหิมพานต์ (Epoxy Phenol Cashew Nut Shell Liquid: EPCNSL โดยศึกษาผลของปริมาณสารเพิ่มความเหนียว EPCNSL และ ผลของปริมาณผ้าไหมต่อสมบัติทางกลของวัสดุคอมพอสิต [26] นอกจากนี้ได้มีการศึกษาการใช้ผ้าไหมใช้แล้วเป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับวัสดุคอมพอสิตพอลิโพรพิลีน โดยเปรียบเทียบระหว่างผ้าไหมที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายไกลซีดีลโพรพิลไซเลน [27]

จากข้อมูลดังกล่าวมาจะเห็นได้ว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เส้นไหมเป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับวัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์โดยตรงยังมีอยู่น้อย จึงควรมีการศึกษาวิจัยทางด้านการใช้เส้นไหมแบบต่อเนื่องเป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับวัสดุคอมพอสิตอีพอกซี โดยผลงานวิจัยพื้นฐานทางด้านส่วนประกอบและโครงสร้างของเส้นไหม การทรีทเมนต์ด้วยสารเคมีและความร้อน จะเป็นพื้นฐานความรู้สำหรับการวิจัยทางด้านนี้ได้

1.6 ขอบเขตการวิจัย

- หาปริมาณที่เหมาะสมของเส้นไหมแบบต่อเนื่องสำหรับวัสดุคอมพอสิตอีพอกซี
- ปรับปรุงความสามารถในการยึดติดระหว่างพื้นผิวของเส้นไหมกับอีพอกซีเรซิน ด้วยสารคู่ควบไซเลน



เอกสารอ้างอิง

1. W. Bascom. *Other Continuous Fibers*. in *Composites, Engineered Materials Handbook: 1*. Material Park. ASM International. 1988.
2. D. K. Setua and G. N. Mathur. *J. Appl. Polym. Sci.*. **79**: 646-651. 2001.
3. M. Tsukada, T. Yamamoto, N. Nakabayashi, et al. *J. Appl. Polym. Sci.*. **43**: 2115-2121. 1991.
4. D. K. Setua. *Abstr. Pap. Am. Chem. S.*. **189**:56-PMSE. 1985.
5. D. K. Setua and S. K. De. *J. Mater. Sci.*. **19**: 983-999. 1984.
6. V. Annadurai, G. Subramanyam, R. Gopalkrishne Urs, and R. Somashekar. *J. Appl. Polym. Sci.*. **79**: 1979-1985. 2001.
7. Y. Shen, M. A. Johnson, and D. C. Martin. *Macromolecules*. **31**: 8857-8864. 1998.
8. วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์. รายงานวิจัยเรื่องการใช้เส้นใยจากตัวไหมเป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับวัสดุเชิงประกอบอีพอกซี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา. 2549.
9. S. Putthanarat, N. Stribeck, S. A. Fossey, R. K. Eby, and W. W. Adams. *Polymer*. **41**: 7735-7747. 2000.
10. C.-Z. Zhou, F. Confalonieri, M. Jacquet, R. Perasso, Z.-G. Li, and J. Janin. *Proteins: Structure, Function, and Genetics*. **44**: 119-122. 2001.
11. K.-H. Ghos, K. Weissart, and F. Grosse. *Rev. Molecular Biotechnology*. **74**: 121-134. 2000.
12. T. Asakura, T. Ito, M. Okudaira, and T. Kameda. *Macromolecules*. **32**: 4940-4946. 1999.
13. Y. Kawahara and M. Shioya. *J. Appl. Polym. Sci.*. **73**: 363-367. 1999.
14. L. D. Miller, S. Putthanarat, R. K. Eby, and W. W. Adams. *Int. J. Biol. Macromol.*. **24**: 159-165. 1999.
15. Y. Takahashi, M. Gehoh, and K. Yuzuriha. *Int. J. Biol. Macromol.*. **24**: 127-138. 1999.
16. P. Monti, G. Freddi, A. Bertoluzza, and M. Tsukada. *J. Raman Spectrosc.*. **29**: 297-304. 1998.
17. M. Dumura, M. Minami, T. Asakura, and T. A. Cross. *J. Am. Chem. S.*. **120**: 1300-1308. 1998.
18. M. Dumura, Y. Yamazaki, T. Asakura, and K. Ogawa. *J. Am. Chem. S.*. **441**: 155-163. 1998.
19. J. Perez-Rigueiro, C. Viney, J. Llorca, and M. Elices. *J. Appl. Polym. Sci.*. **70**: 2439-2447. 1998.
20. H. Zhang, J. Magoshi, M. Bexker, J. Y. Chen and R. Matsunaga, *J Appl. Polym. Sci.*, **86**: 1817-1820, 2002.
21. H.Y. Kweon, I.C. Um and Y.H. Park, *Polymer*, **41**: 7361-7367, 2000.

22. M. Tsukada, T. Arai, S. Winkler, G. Freddi, and H. Ishikawa. *J. Appl. Polym. Sci.* **79**: 1764-1770. 2001.
23. E. P. Plueddumann. *Silane Coupling Agent: 2nd Ed.* Plenum Press. New York. 1991.
24. J. P. Craven, R. Cripps, and C. Viney. *Composite Part A*. **31**: 653-660. 2000.
25. S.M. Lee, D. Cho, W.H. Park, S.G. Lee, S.O. Han and L. T. Drzal, *Comp. Sci. Tech*, **65**: 647-657, 2005.
26. S.P. Priya, H.V. Ramakrishna, and S.K. Rai, *J. Comp. Mater.*, **40**: 1301-1308, 2006.
27. D. Cho, K. H. Kim, H. S. Lee, C. W. Cho, K. Y. Lee, J. M. Seo, and J. H. Kim, *The 2nd International Conference on Advances in Petrochemicals and Polymers*, Bangkok, Thailand, **BC-P23**, 2007.



บทที่ 2

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของผืนผ้าไหม

2.1 ขอบเขตการวิจัย

- ใช้ผ้าไหมทอหลายหนึ่ง ทอด้วยเส้นไหมสายพันธันงานน้อย
- เตรียมผืนผ้าไหมใน 2 รูปแบบคือ ผืนผ้าไหมที่ไม่ผ่านการตัดแปรพื้นผิว และผืนผ้าไหมที่ผ่านการตัดแปรพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent)
- ทดสอบสมบัติทางกายภาพของผืนผ้าไหมที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผืนผ้าไหมดังนี้ ความทนต่อแรงดึง สมบัติทางความร้อน หมู่ฟังก์ชันทางเคมี และสัณฐานวิทยา

2.2 การทดลอง

2.2.1 วัตถุดิบและสารเคมี

- ผืนผ้าไหมทอ (silk fabric, SF) แบบหลายหนึ่ง (plain weaving) สายพันธันงานน้อย จากกลุ่มแม่บ้านทอผ้า อ. สัมปอัย จ. ศรีสะเกษ
- 3-อมีโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-aminopropyltriethoxysilane, APTES) (A1100) จากบริษัท Italmar (Thailand) Co., Ltd.
- กรดอะซิติก (acetic acid) analytical grade จากบริษัท Sigma-Aldrich Pte., Ltd.

2.2.2 การเตรียมผืนผ้าไหมแบบไม่ผ่านการแปร (Untreated – Silk Fabric, UT-SF)

- อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

2.2.3 การเตรียมผืนผ้าไหมที่ตัดแปรด้วยสารคู่ควบไซเลน (Silane - Treated Silk Fabric, ST-SF)

- เตรียมสารละลาย 3-อมีโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปรับค่า pH ของสารละลายเป็น 3.5 โดยใช้สารละลายกรดอะซิติกเจือจาง
- ตัดแปรผืนผ้าไหมที่ได้จาก หัวข้อ 2.2.2 ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยแช่ผืนผ้าไหมในสารละลายไซเลนที่เตรียมไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ใช้ปริมาณเส้นไหม 1 กรัม ต่อสารละลายไซเลน 10 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำผืนผ้าไหมออกมาล้างด้วยน้ำกลั่น 2-3 ครั้ง แล้วนำผืนผ้าไหมไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

2.2.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของผืนผ้าไหม

2.2.4.1 การทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile Test)

ทดสอบความทนต่อแรงดึงด้วยเครื่อง universal testing machine (Lloyds LR-5K) Load cell 5 kN ใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D5034 ภายใต้ gauge length 7.5 เซนติเมตร และอัตราเร็วในการดึง 300 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการทดสอบทั้งในแนวเส้นพุ่ง (weft direction) และเส้นยืน (warp direction) ของผืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ ST-SF

2.2.4.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยวิเคราะห์พลังงานภายใต้ความร้อน ด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter (Perkin Elmer DSC7) โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างด้วยอัตราเร็วคงที่ 20 องศาต่อนาที ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 250 องศาเซลเซียส โดยทำการทดสอบผืนผ้าไหมทั้งแบบ UT-SF และ ST-SF

ทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน ด้วยเครื่อง thermogravimetric analyzer (TA Instruments SDT 2960) โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างด้วยอัตราเร็วคงที่ 20 องศาต่อนาที ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 800 องศาเซลเซียส โดยทำการทดสอบผืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ ST-SF

2.2.4.3 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันเคมี (Chemical Functional Group)

ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันเคมีด้วยเครื่อง ATR Fourier transform Infrared spectrometer (FTIR Bruker Tenser 27) ทดสอบผืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ ST-SF ในช่วงเลขคลื่น (wave number) $4000-800\text{ cm}^{-1}$ Resolution 4 cm^{-1} และ scan no. 62

2.2.4.4 การวิเคราะห์ปริมาณซิลิกาของผืนผ้าไหม

วิเคราะห์หาปริมาณซิลิกาจากเถ้าที่ได้จากการเผาผืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ ST-SF ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometer (Philips, PW2400 K_{α} radiation) ภายใต้ accelerating voltage 80-100 kV และ กระแส 24-30 mA

2.2.4.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของเส้นไหมด้วยเครื่อง scanning electron microscope (Jeol JSM 6400) ที่ 10 kV โดยศึกษาพื้นผิวของเส้นใยไหมของผืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ ST-SF ขึ้นทดสอบถูกเคลือบด้วยทองเพื่อหลีกเลี่ยงการ charge ของอิเล็กตรอน และเพิ่ม contrast

2.3 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของผืนผ้าไหม

2.3.1 ความทนต่อแรงดึงของผืนผ้าไหม

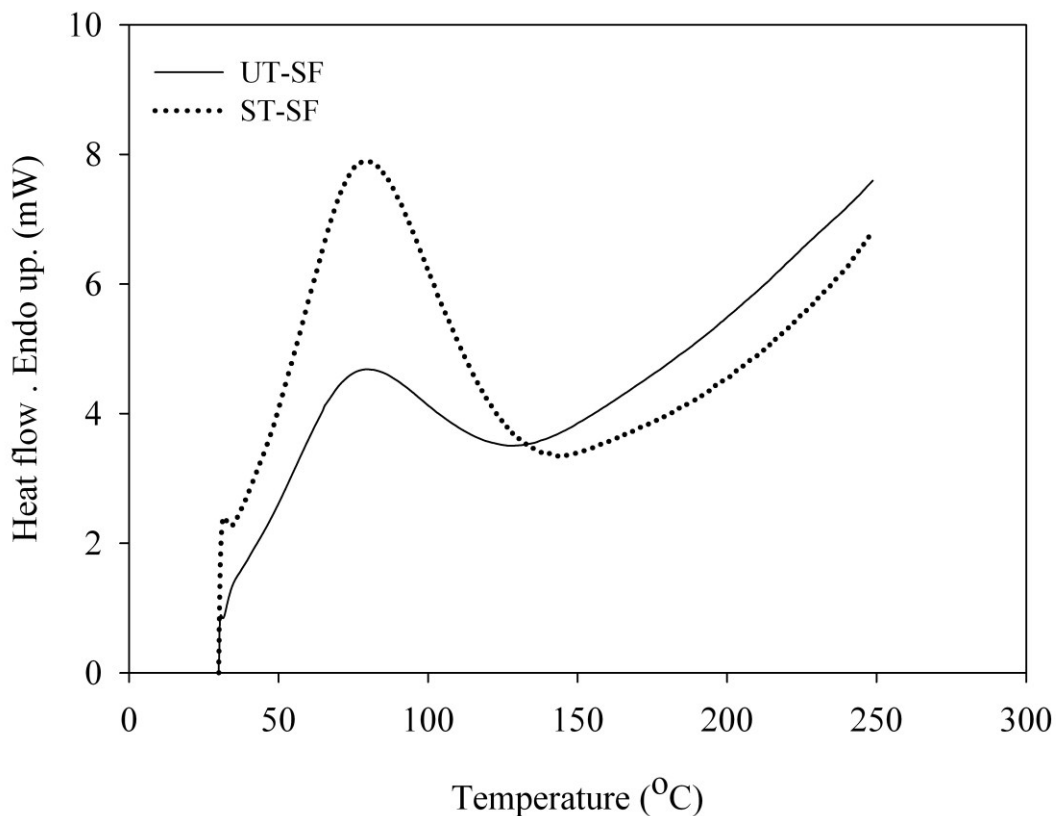
ผืนผ้าไหมมีการทอแบบลายหนึ่ง (plain weaving) มีจำนวนเส้นด้ายเฉลี่ยในแนวเส้นยืน (warp direction) 177 เส้นต่อ 10 เซนติเมตร และในแนวเส้นพุ่ง (weft direction) 201 เส้นต่อ 10 เซนติเมตร ค่าความทนต่อแรงดึงในแนวเส้นยืนและเส้นพุ่งของผืนผ้าไหม คือ 537 และ 555 นิวตัน ตามลำดับ และผืนผ้าไหมที่ไม่ผ่านการตัดแปร (UT-SF) มีความทนต่อแรงดึง (tensile strength) การยืดตัวก่อนขาด (elongation at break) ต่ำกว่าผืนผ้าไหมที่ผ่านการตัดแปรพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน (ST-SF) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติความทนต่อแรงดึงและการยืดตัวก่อนขาดของผืนผ้าไหมแบบ ST-SF และ UT-SF

ทิศทางการทดสอบ	ผืนผ้าไหม UT-SF		ผืนผ้าไหม ST-SF	
	ความทนต่อแรงดึง (N)	การยืดตัวก่อนขาด (%)	ความทนต่อแรงดึง (N)	การยืดตัวก่อนขาด (%)
แนวเส้นยืน: 177 ends/10 cm	537.00± 0.95	15.22±0.57	813.41±97.40	33.80±45.06
แนวเส้นพุ่ง: 201picks/10cm	555.00± 1.26	16.08±0.86	827.87±116.62	45.05±1.70

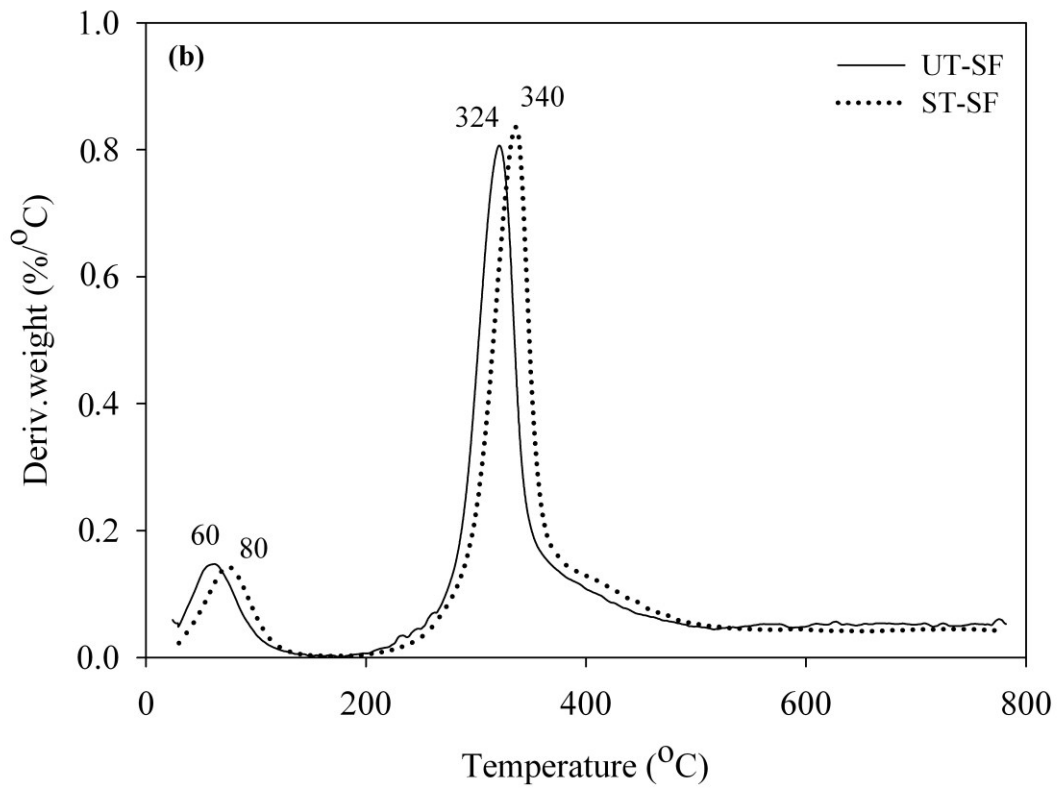
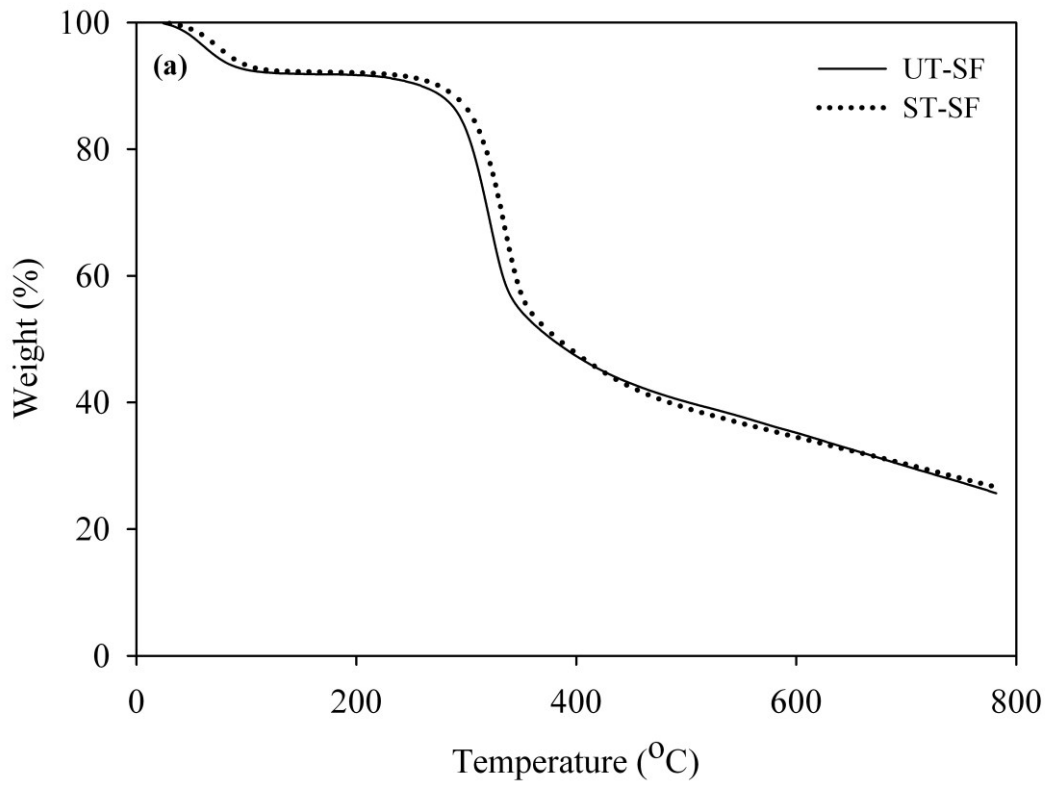
2.3.2 สมบัติทางความร้อนของผิวน้ำไหม

กราฟ DSC thermogram ของ UT-SF และ ST-SF จากการวิเคราะห์พลังงานภายใต้ความร้อน แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานแบบดูดความร้อน ที่ 75 องศาเซลเซียส และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เนื่องจากการระเหยออกของความชื้นในเส้นไหม ซึ่งสอดคล้องและใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเสื่อมสลายที่หนึ่งจากกราฟ DTGA ของผิวน้ำไหมทั้งสองแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (b) อย่างไรก็ตามอุณหภูมิทรานซิชันแก้วของเฟสอสัณฐานของไฟโบรอินไม่สามารถสังเกตได้จาก DSC thermogram ของผิวน้ำไหมทั้งสองแบบ



รูปที่ 2.1 กราฟ DSC thermogram ของผิวน้ำไหมแบบ UT-SF และ ST-SF

กราฟ TGA และ DTGA จากการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อนของผิวน้ำไหม UT-SF และ ST-SF แสดงในรูปที่ 2.2 จากกราฟแสดงให้เกิดทรานซิชันเนื่องจากความร้อน (thermal transition) 2 ช่วง อุณหภูมิทรานซิชันที่ 1 (the first transition temperature) ของ UT-SF และ ST-SF เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากการระเหยออกของความชื้นในผิวน้ำไหม ปริมาณความชื้นของผิวน้ำไหมประมาณร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิทรานซิชันที่ 2 คือ 324 องศาเซลเซียส และ 340 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากการเสื่อมสลายของไฟโบรอินของ UT-SF และ ST-SF ตามลำดับ [1, 2] การดัดแปรพื้นผิวผ้าไหมด้วยสารคู่ควบ APTES ทำให้ผิวน้ำไหมแบบ ST-SF เสื่อมสลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจาก APTES เกิดอันตรกิริยาเคมีกับหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวเส้นไหมผ่านหมู่ไฮดรอกซิลของ APTES ส่งผลทำให้มีชั้นของสารคู่ควบปกคลุมที่พื้นผิวเส้นไหม สอดคล้องกับ SEM micrograph ของ เส้นไหมจากผิวน้ำไหมแบบ ST-SF

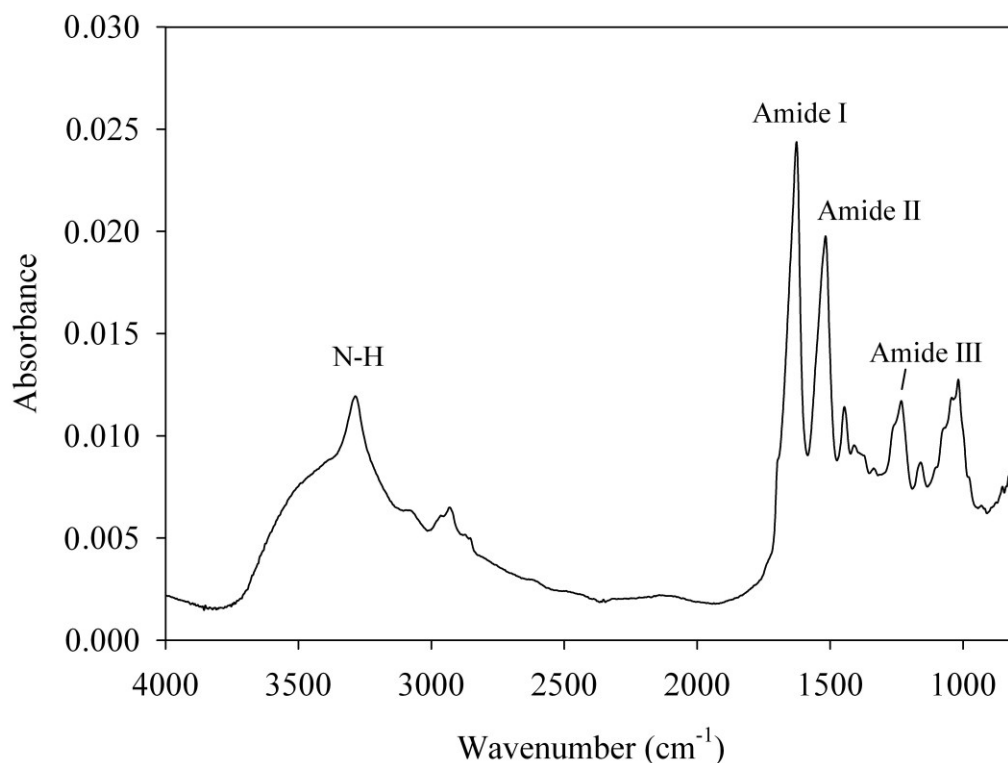


รูปที่ 2.2 กราฟ TGA (a) และ DTGA (b) ของผ้าไหมแบบ UT-SF และ ST-SF

2.3.3 หมู่ฟังก์ชันเคมีและโครงสร้างของเส้นไหม

จาก ATR FTIR (Fourier transform Infrared) spectrum ของ UT-SF ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ผืนผ้าไหมแสดงการสั่นของ หมู่ N-H, amide I, amide II และ amide III อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 3215, 1650, 1530 และ 1238 cm^{-1} ซึ่งหมู่ฟังก์ชันของ amide I, amide II และ amide III ชี้ให้เห็นว่า โครงสร้างของเส้นไหมประกอบด้วยเฟสอสัณฐาน (crystalline phase) และเฟสผลึก (amorphous phase) พีกที่ตำแหน่ง 1650 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของหมู่ฟังก์ชันของไฟโบรอินที่มีโครงสร้างแบบ α -helix ในบริเวณที่เป็นเฟสอสัณฐาน พีกที่ตำแหน่ง 1530 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของหมู่ฟังก์ชันของไฟโบรอินที่มีโครงสร้างแบบ β -sheet ในบริเวณที่เป็นเฟสผลึก สำหรับพีกที่ตำแหน่ง 1238 cm^{-1} เป็นผลมาจากการสั่นของหมู่ฟังก์ชันของไฟโบรอินทั้งแบบ α -helix และ β -sheet การที่ไฟโบรอินของเส้นไหมมีส่วนของ β -sheet อยู่เป็นจำนวนมากนั้น จะส่งผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงของเส้นไหมที่เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่เป็นระเบียบมากขึ้นในเฟสผลึก [3]

ตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าภายหลังการดัดแปรผืนผ้าไหมด้วยสารประสาน APTES มีปริมาณซิลิคอน (silicon) บนผืนผ้าไหมเพิ่มขึ้น ปริมาณซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นนี้มาจากซิลิคอนอะตอมที่เป็นองค์ประกอบของสารประสานซิลเลน APTES สารประสาน APTES เกิดอันตรกิริยาเคมีกับหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ตรงพื้นผิวเส้นไหม



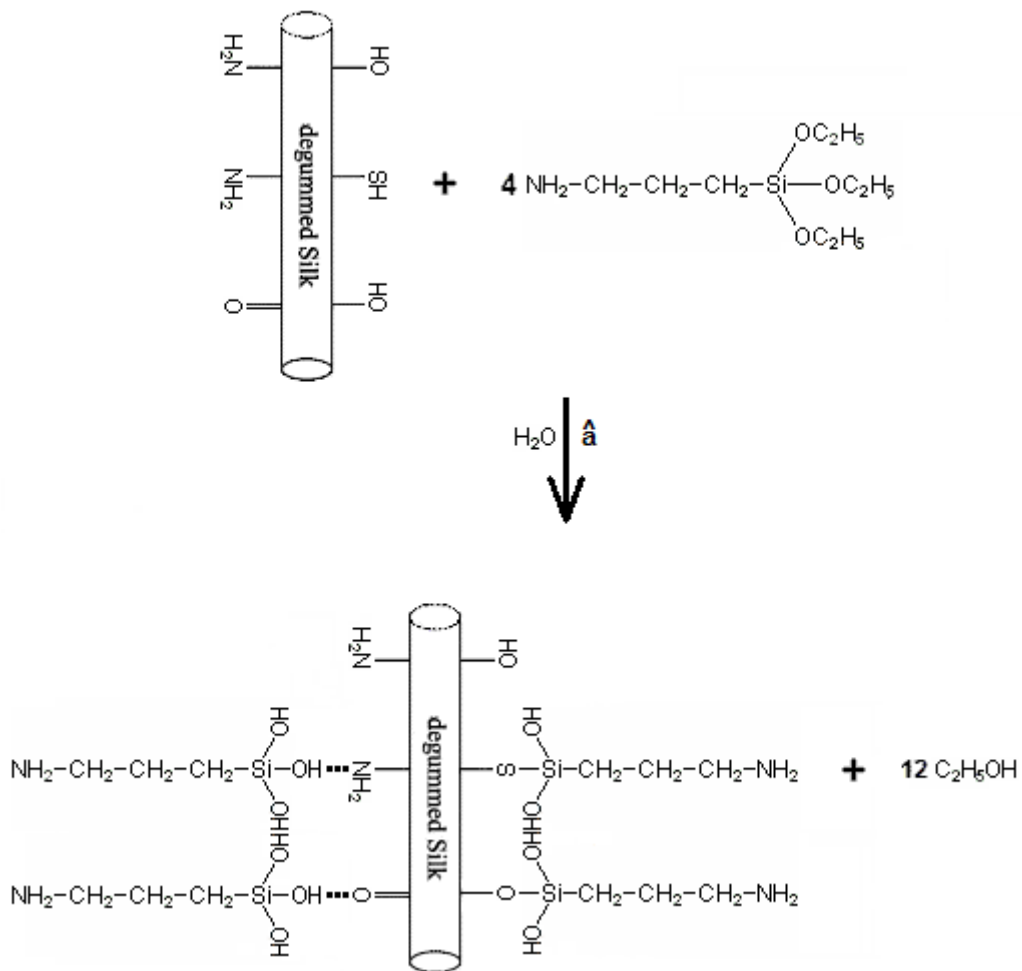
รูปที่ 2.3 ATR FTIR spectrum ของผืนผ้าไหม UT-SF

การปรับปรุงผืนผ้าไหมด้วยสารประสาน APTES เพื่อให้สารประสานซิลเลนทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมทางเคมี (chemical bridge) ระหว่างอีพอกซีเมทริกซ์และพื้นผิวเส้นไหม พื้นผิวเส้นไหมมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) และ หมู่ไทออล -SH (thiol group) เป็นองค์ประกอบจากหน่วยซ้ำของ เซอรีน และ ซิสเตอีน และส่วนที่เป็น amino linkage ที่ประกอบ คาร์บอนิล (carbonyl group) และ

เอมีน (amine group) กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบของเส้นไหม คือ ไกลซีน (glycine) อลานีน (alanine) เซอรีน (serine) ซิสเตอีน (cysteine) และ ลิวซีน (leucine) หมู่เอทอกซี (ethoxy group) ของสารประสาน APTES เกิดไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ในสภาวะที่เป็นกรด ได้เป็นหมู่ซิลานอล (silanol group) ที่สามารถควมแน่นกับหมู่ไฮดรอกซิลและไทออล หรือหมู่ซิลานอลสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) กับ หมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) และเอมีน ดังแสดงในแผนภาพที่ 2.1

ตารางที่ 2.2 ปริมาณซิลิคอนจากเส้นไหมที่ได้จากการเผาไหม้ผ้าไหม UT-SF และ ST-SF

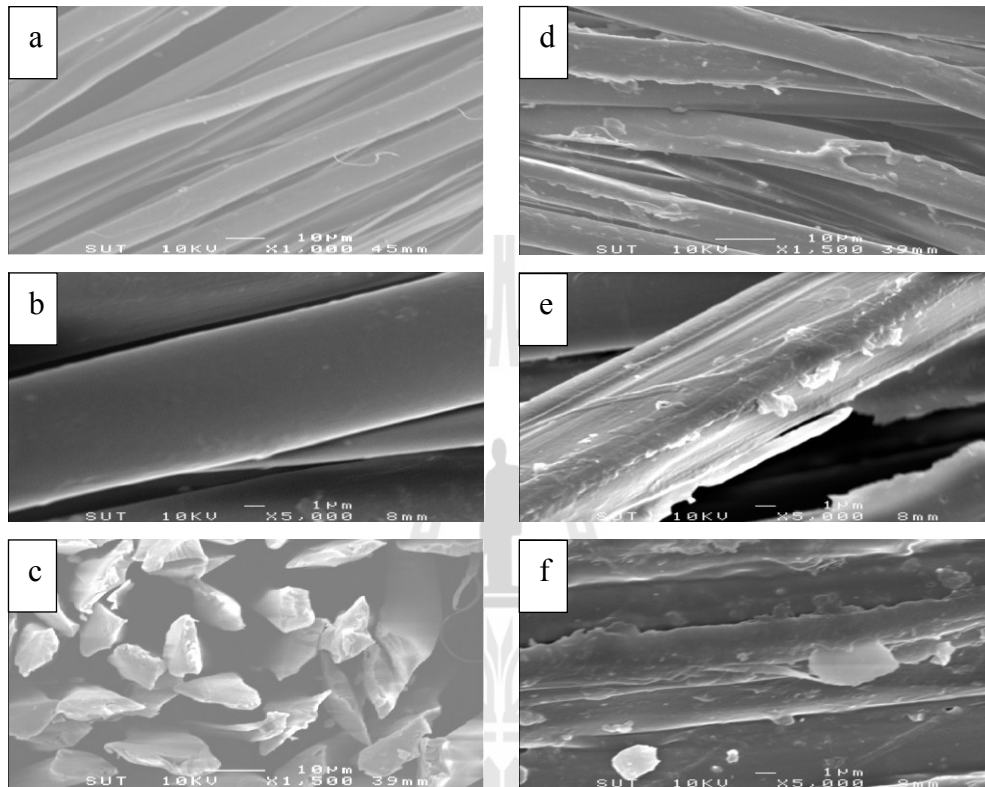
ชนิดผ้าไหม	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	
	เส้นไหม	ซิลิคอน (Si)
UT-SF	7.3	10.5
ST-SF	9.8	30.3



แผนภาพที่ 2.1 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวเส้นไหมและสารประสาน APTES

2.3.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นไหม

จากภาพ SEM micrograph ของเส้นไหมของ UT-SF จะเห็นได้ว่า เส้นไหมมีพื้นผิวที่เรียบ และภาพตัดขวางของเส้นไหมมีรูปร่างเป็น irregular shape ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (a, b, c) สำหรับเส้นไหมของ ST-SF จะมีพื้นผิวขรุขระ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.4 (d, e, f) เป็นหลักฐานการบ่งชี้ว่าเส้นใยถูกปกคลุมด้วยสารคู่ควบไซเลน APTES โดยอาศัยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ของสารคู่ควบไซเลนเกิดเป็นพันธะซิลอกเซน (siloxane, Si-O-Si)



รูปที่ 2.4 SEM micrographs ของเส้นไหม UT-SF (a, b, c) และ ST-SF (d, e, f)

2.4 สรุปผลการศึกษา

- ผืนผ้าไหมมีจำนวนเส้นด้ายเฉลี่ยในแนวเส้นยืน (warp direction) 177 เส้นต่อ 10 เซนติเมตร และในแนวเส้นพุ่ง (weft direction) 201 เส้นต่อ 10 เซนติเมตร มีค่าความทนต่อแรงดึงในแนวเส้นยืน 537 นิวตัน และในแนวเส้นพุ่ง 555 นิวตัน
- โครงสร้างเส้นไหมของผืนผ้าไหมประกอบด้วยเฟสอสัณฐานและเฟสผลึก ปริมาณความชื้นของผืนผ้าไหมประมาณร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก
- ผืนผ้าไหมแบบ UT-SF เสื่อมสลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 324 องศาเซลเซียส การตัดแปรพื้นผิวผ้าไหมด้วยสารคู่ควบไซเลนทำให้ผืนผ้าไหมแบบ ST-SF เสื่อมสลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นเท่ากับ 340 องศาเซลเซียส
- เส้นไหมของ UT-SF มีพื้นผิวที่ราบเรียบ ในขณะที่เส้นไหมของ ST-SF มีสารเคลือบอยู่ที่พื้นผิวดูเหมือนเป็นชั้นของสารคู่ควบที่ควบแน่นบนพื้นผิวเส้นไหม

เอกสารอ้างอิง

1. S.M. Lee, D. Cjp, W.H. Park, S.G. Lee, S.O. Han, and L. T. Drzal. *Comp. Sci. Tech.*.. **65**: 647-657. 2005.
2. A. Das, C.N. Saikia, and S. Hussain, *J. Appl. Polm. Sci.*, **81**: 2633-2641. 2001.
3. D. Sargunamani and N. Selvakumar. *Polym. Degrad. Stab.*, **91**: 2644-2653. 2006.



บทที่ 3

การศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นผ้าไหม

3.1 ขอบเขตการวิจัย

- เตรียมวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นผ้าไหม โดยใช้เส้นผ้าไหมสองชนิด คือเส้นผ้าไหมที่ไม่ผ่านการดัดแปรและที่ผ่านการดัดแปรด้วยสารคู่ควบไซเลน
- ทดสอบสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสัญญาณวิทยา ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นผ้าไหม

3.2 การทดลอง

3.2.1 วัตถุดิบและสารเคมี

- เส้นผ้าไหม (silk fabric) ทอหลายหนึ่ง (plain weaving silk) สายพันธันนางน้อย ขนาด 30 x 30 ตารางเซนติเมตร จากกลุ่มแม่บ้านทอผ้าสัมป่อย อ. ราชีไศล จ. ศรีสะเกษ
- อีพอกซีเรซิน (EPOTEC YD127) จากบริษัท Thai Organics Chemical Co., Ltd.
- เทตราเอทิลีนเทตราไมน์ (tetraethylenetetramine, TETA) จากบริษัท Vista Co., Ltd.
- สารลดฟองอากาศ (defoamer BYK A560) จากบริษัท Coloshal International Co., Ltd.

3.2.2 การเตรียมอีพอกซีวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นผ้าไหม

ในการเตรียมอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นผ้าไหม อีพอกซีเรซินและตัวเร่งแข็งเทตราเอทิลีนเทตราไมน์ถูกผสมในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100:13.2 เพื่อเตรียมอีพอกซีเมทริกซ์ โดยก่อนการผสมหยดสารลดฟองอากาศ 0.0015 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในอีพอกซีเรซิน จากนั้นคนและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อลดปริมาณฟองอากาศในอีพอกซีเรซิน แล้วจึงนำไปผสมกับเทตราเอทิลีนเทตราไมน์

การขึ้นรูปอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีใช้วิธีการลามิเนตด้วยมือ (hand lay-up lamination) สำหรับการเสริมแรงวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีใช้เส้นผ้าไหม 2 ชนิด คือ เส้นผ้าไหมที่ยังไม่ผ่านการดัดแปร (untreated-silk fabric, UT-SF) และ เส้นผ้าไหมที่ผ่านการดัดแปรด้วย 3-อมีโนโพรพิล ไตรเอทอกซีไซเลน (silane treated-silk fabric, ST-SF) และใช้สัดส่วนมวล (weight fraction) ของเส้นผ้าเป็น 0.18, 0.30 และ 0.35 เทียบกับปริมาณอีพอกซีเมทริกซ์

อีพอกซีที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยเส้นผ้าไหมและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นผ้าไหมจะถูกปล่อยให้แข็งตัวในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงแกะออกจากแม่พิมพ์แล้วนำไปอบบ่ม (post cured) ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นผ้าไหมจะถูกตัดให้ได้ขนาดของชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ ในขั้นตอนต่อไป

3.2.3 การทดสอบสมบัติอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม

3.2.3.1 การทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile Test)

ทดสอบด้วยเครื่อง universal testing machine (Instron 5569) Load cell เท่ากับ 50 กิโลนิวตัน โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D5083 ภายใต้อัตราเร็วในการดึง 5 มิลลิเมตรต่อนาที

3.2.3.2 การทดสอบความทนต่อแรงดัด (Flexural Test)

ทดสอบด้วยเครื่อง universal testing machine (Instron 5569) Load cell เท่ากับ 50 กิโลนิวตัน โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D790 ภายใต้อัตราเร็วในการกด 2.65 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะระหว่างแท่นค้ำยัน (support span) 96 มิลลิเมตร

3.2.3.3 การทดสอบความทนต่อแรงตกกระแทก (Impact Test)

ทดสอบด้วยเครื่อง pendulum impact tester (Atlas BPI BP-2011) โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D256 วางชิ้นทดสอบในแนวตั้ง และไม่บากชิ้นทดสอบ

3.2.3.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน ด้วยเครื่อง thermogravimetric analyzer (TA Instruments, SDT 2960) โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างด้วยอัตราเร็วคงที่ 20 องศาต่อนาที ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 800 องศาเซลเซียส

ทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยวิเคราะห์พลังงานภายใต้ความร้อน ด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter (Perkin Elmer, DSC7) โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างด้วยอัตราเร็วคงที่ 20 องศาต่อนาที ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 250 องศาเซลเซียส

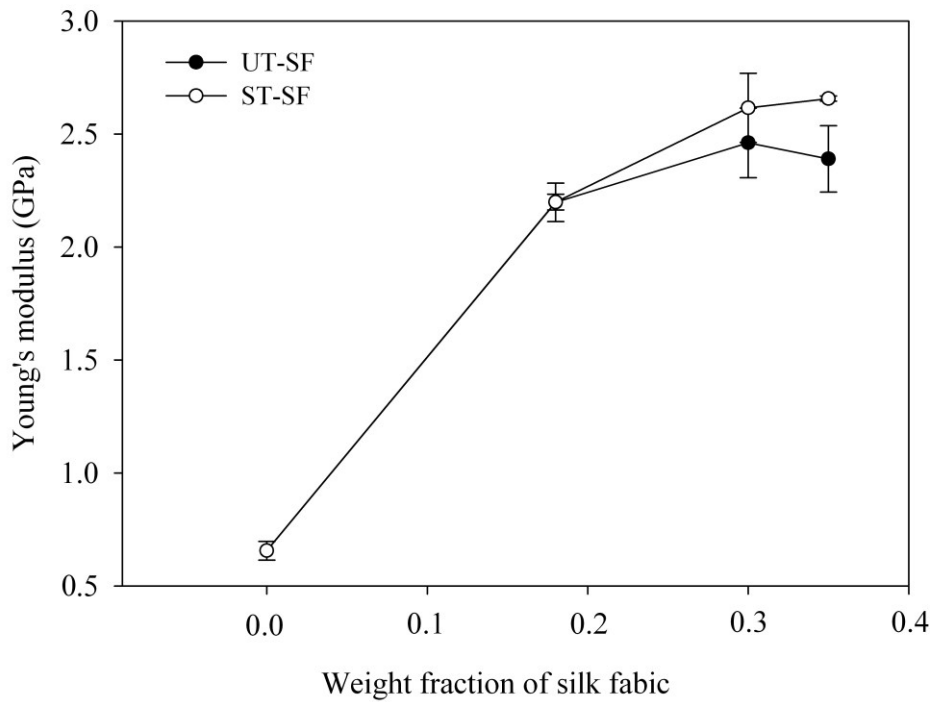
3.2.3.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ทดสอบด้วยเครื่อง scanning electron microscope (Jeol, JSM 6400) ที่ 10 kV โดยศึกษาพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่ผ่านการทดสอบความทนต่อแรงดัด ชิ้นทดสอบถูกเคลือบด้วยทองเพื่อหลีกเลี่ยงการ charge ของอิเล็กตรอน และเพิ่ม contrast

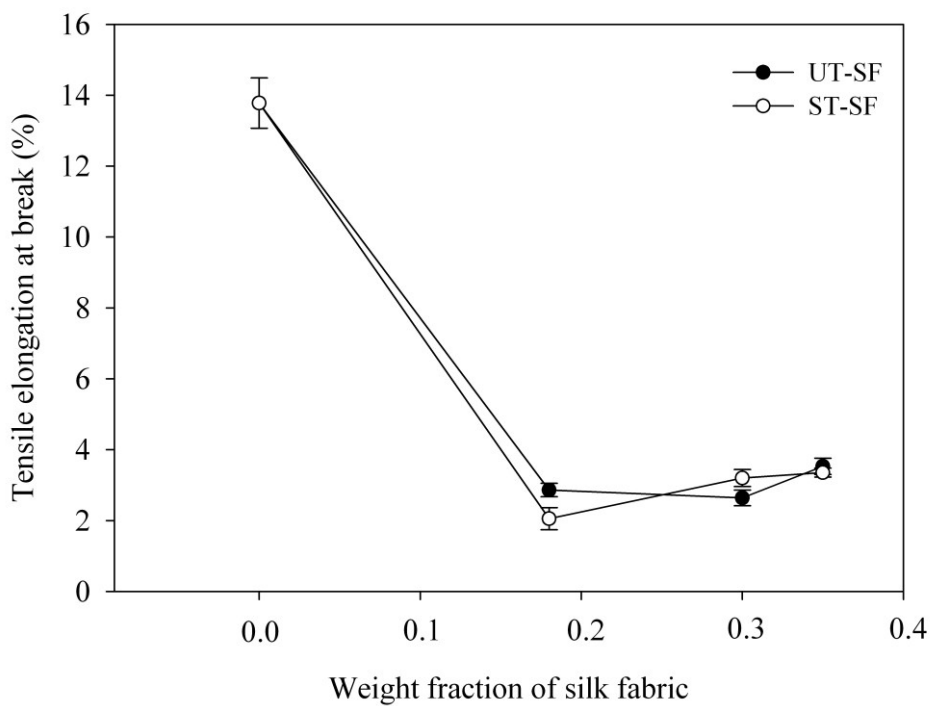
3.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

3.3.1 สมบัติทางกลของอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหม

จากรูปที่ 3.1 วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมทั้งแบบ UT-SF และ ST-SF มีค่ามอดูลัสของยังก์ (Young's modulus) เพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนโดยมวลของเส้นใยไหมเพิ่มขึ้น และ วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ ST-SF มีค่ามอดูลัสของยังก์มากกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF เล็กน้อย การยืดออกได้ก่อนขาด (elongation at break) ของอีพอกซีมีค่าสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมทั้งแบบ UT-SF และ ST-SF โดยวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมทั้งแบบ UT-SF และ ST-SF มีค่าการยืดออกก่อนขาดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อสัดส่วนโดยมวลของเส้นใยไหมมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.2

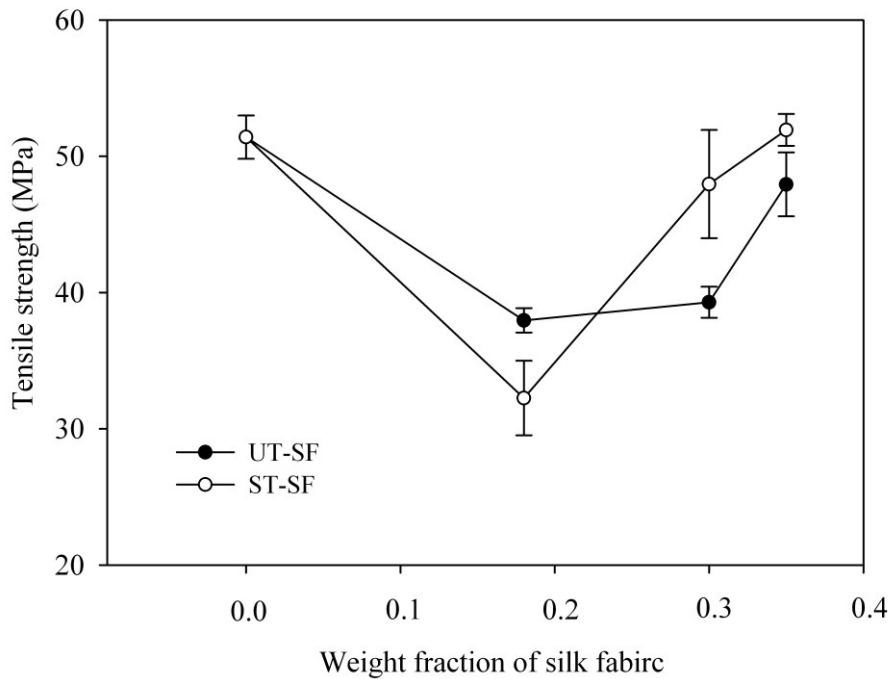


รูปที่ 3.1 กราฟระหว่างค่ามอดูลัสของยังก์ (Young's modulus) และสัดส่วนโดยมวลของฝ้ายไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝ้ายไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF



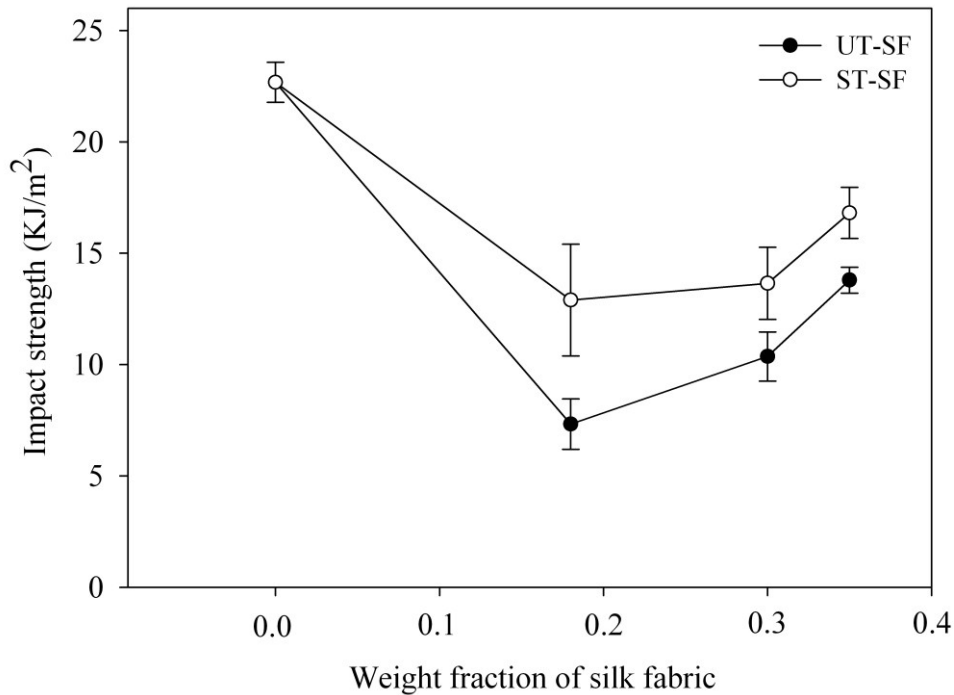
รูปที่ 3.2 กราฟระหว่างค่าการยืดออกก่อนขาด (elongation at break) และสัดส่วนโดยมวลของฝ้ายไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝ้ายไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF

จากรูปที่ 3.3 ความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ของอีพอกซีมีค่าสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมทั้งแบบ UT-SF และ ST-SF โดยวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมทั้งแบบ UT-SF และ ST-SF มีค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนโดยมวลของเส้นใยไหมเพิ่มขึ้น และที่สัดส่วนของเส้นใยไหมเท่ากับ 0.35 ความทนต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีมีค่าใกล้เคียงกับความทนต่อแรงดึงของอีพอกซี นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ ST-SF มีค่าความทนต่อแรงดึงมากกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF เล็กน้อยเมื่อสัดส่วนโดยมวลของเส้นใยไหมเท่ากับหรือมากกว่า 0.3



รูปที่ 3.3 กราฟระหว่างความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และสัดส่วนโดยมวลของเส้นใยไหมของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF

ค่าความทนต่อแรงกระแทก (impact strength) ของอีพอกซีมีค่าสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมทั้งแบบ UT-SF และ ST-SF ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.4 อย่างไรก็ตามเมื่อสัดส่วนโดยมวลของเส้นใยไหมของ UT-SF และ ST-SF เพิ่มขึ้นจาก 0.18 เป็น 0.35 ส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหม UT-SF และ ST-SF เพิ่มขึ้นเป็น 14 kJ/m^2 และ 17 kJ/m^2 ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ ST-SF มีค่ามากกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยไหมด้วยสารคู่ควบไซเลนส่งผลให้ interfacial void ที่บริเวณพื้นผิวระหว่างเส้นใยไหมและอีพอกซีลดลง และเมื่อปริมาณของเส้นใยไหมเพิ่มขึ้นระยะห่างกันระหว่างชั้นน้อยลง ชั้นใยไหมสามารถดูดซับพลังงานที่ทำให้เกิดก่อนการแตกหักได้ และเป็นชั้นที่หยุดการโตของรอยแตก (crack propagation) ในอีพอกซีเมทริกซ์ ส่งผลต่อค่าความทนต่อแรงกระแทกที่มากขึ้นอันเนื่องมาจากปริมาณเส้นใยไหมที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลเดียวกันนี้ที่ความทนต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมสูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยไหมเพิ่มขึ้น

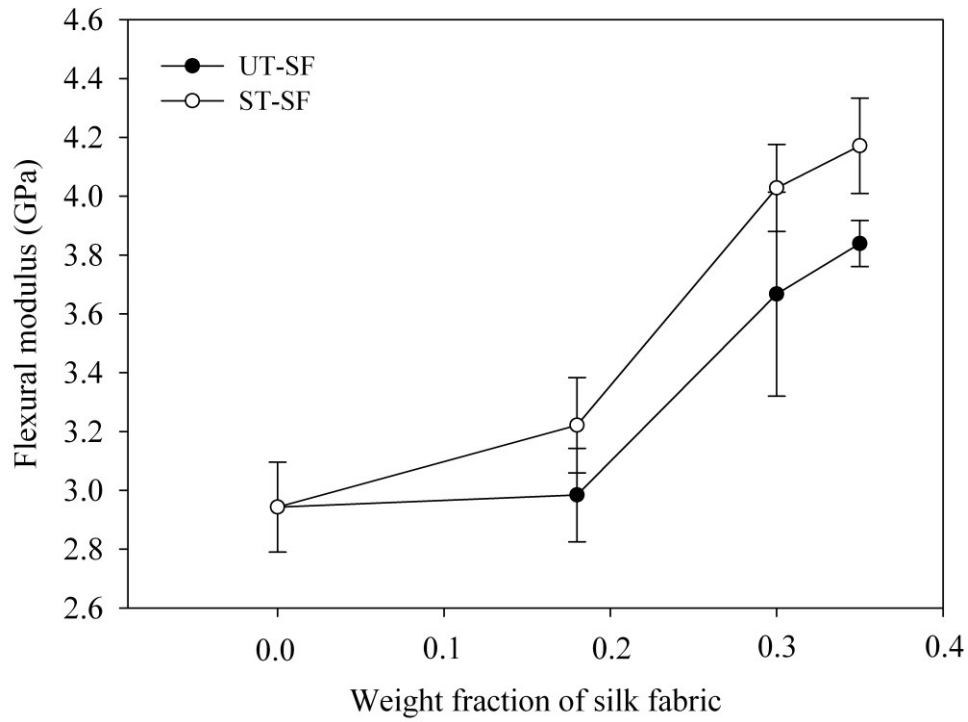


รูปที่ 3.4 กราฟระหว่างความทนต่อแรงกระแทก (impact strength) และสัดส่วนโดยมวลของฝ้ายไหม ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝ้ายไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF

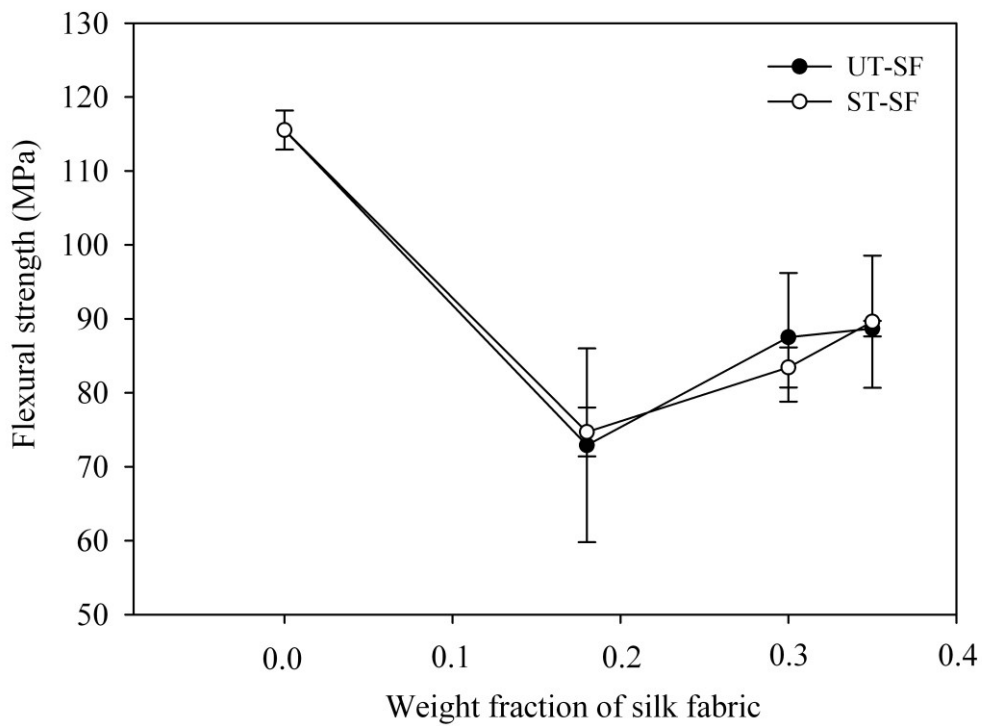
จากรูปที่ 3.5 ค่ามอดุลัสแรงดัด (flexural modulus) ของอีพอกซีมีค่าต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยฝ้ายไหมทั้งแบบ UT-SF และ ST-SF โดยวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝ้ายไหมแบบ ST-SF มีค่ามอดุลัสแรงดัดสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝ้ายไหมแบบ UT-SF และมอดุลัสแรงดัดของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนโดยมวลของฝ้ายไหมที่เพิ่มขึ้น

วัสดุอีพอกซีเชิงประกอบเสริมแรงด้วยฝ้ายไหมทั้งแบบ UT-SF และ ST-SF มีค่าความทนต่อแรงดัด (flexural strength) น้อยกว่าอีพอกซี อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยมวลของฝ้ายไหมวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีมีความทนต่อแรงดัดเพิ่มขึ้น และ วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝ้ายไหมแบบ ST-SF มีค่าความทนแต่แรงดัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญจากวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝ้ายไหมแบบ UT-SF ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.6

สมบัติความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงดัด และ ความทนต่อแรงกระแทก ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยฝ้ายไหมแบบ UT-SF และ ST-SF สรุปดังในตารางที่ 3.1

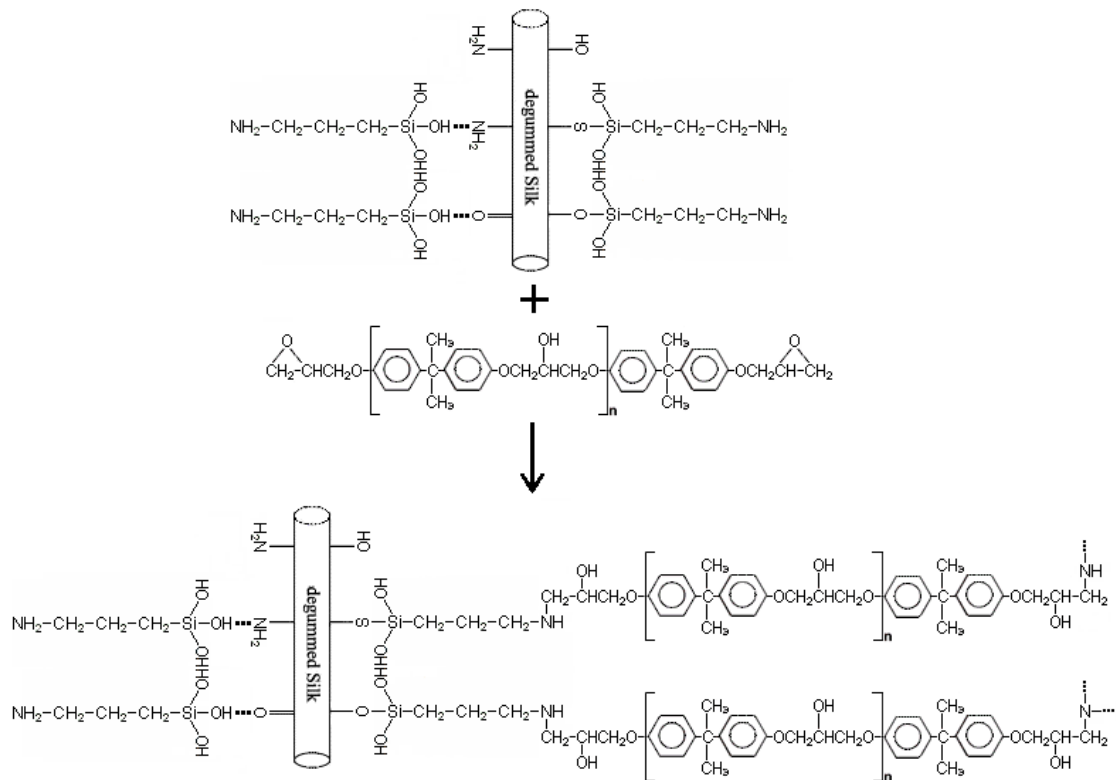


รูปที่ 3.5 กราฟระหว่างมอดูลัสแรงดัด (flexural modulus) และสัดส่วนโดยมวลของฝืนผ้าไหม ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยฝืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF



รูปที่ 3.6 กราฟระหว่างความทนต่อแรงดัด (flexural strength) และสัดส่วนโดยมวลของฝืนผ้าไหม ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยฝืนผ้าไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF

การปรับปรุงผืนผ้าไหมด้วยสารประสานซิลเลน APTES ส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึง และความทนต่อการกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซี แสดงให้เห็นว่าสารประสานซิลเลนทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมทางเคมี (chemical bridge) ระหว่างอีพอกซีเมทริกซ์และพื้นผิวเส้นไหมดังแสดงในแผนภาพที่ 3.1 พื้นผิวเส้นไหมมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) [1]และ หมู่ -SH เป็นองค์ประกอบจากหน่วยซ้ำของ ซีรีน (serine) และ ซิสเตอีน (cysteine) และส่วนที่เป็นกรดอะมิโน (amino acid) ที่ประกอบ คาร์บอนิล (carbonyl group) และเอมีน (amine group) [2] กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบของเส้นไหม คือ ไกลซีน (glycine) อลานีน (alanine) ซีรีน ซิสเตอีน และ ลิวซีน (leucine) [3] หมู่ซิลานอล (silanol group) ของสารประสานซิลเลนสามารถควบแน่นกับ หมู่ไฮดรอกซิล และ -SH หรือ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) กับ คาร์บอนิล (carbonyl group) และเอไมด์ นอกจากนี้สารประสานซิลเลนนี้ที่ปลายอีกด้านหนึ่งของโมเลกุล เป็น หมู่เอมีน (-NH₂) ที่สามารถเกิดพันธะเคมีกับอีพอกซีได้ คือ สามารถทำปฏิกิริยาเปิดวงแหวนอีพอกไซด์ของอีพอกซีเรซินเกิดเป็นพันธะเคมีในลักษณะเดียวกับสารเร่งการแข็งตัวของตัวเชื่อมทำปฏิกิริยากับอีพอกซีเรซิน



แผนภาพที่ 3.1 ปฏิกิริยาระหว่างวงแหวนอีพอกไซด์ของอีพอกซีเรซินกับหมู่เอมีนของสารประสาน APTES

ตารางที่ 3.1 สมบัติความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงดัด และ ความทนต่อแรงกระแทก ของอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF

weight fraction of silk fabric	Young's modulus (GPa)		Tensile strength (MPa)		Impact strength (kJ/m ²)		Flexural modulus (GPa)		Flexural strength (MPa)	
	UT-SF	ST-SF	UT-SF	ST-SF	UT-SF	ST-SF	UT-SF	ST-SF	UT-SF	ST-SF
0.00	0.66±0.04	0.66±0.04	51.41±1.59	51.41±1.59	22.67±0.90	22.67±0.90	2.94±0.15	2.94±0.15	115.53±2.64	115.53±2.64
0.18	2.20±0.08	2.20±0.03	37.96±0.90	32.26±2.74	7.33±1.13	12.90±2.50	2.98±0.15	3.22±0.16	72.9±13.11	74.70±3.31
0.30	2.46±0.15	2.62±0.15	39.29±1.14	47.96±3.96	10.36±1.10	13.65±1.62	3.67±0.34	4.03±0.14	87.51±8.70	83.43±2.71
0.35	2.39±0.15	2.66±0.01	47.94±2.34	51.94±1.17	13.79±0.58	16.81±1.14	3.84±0.07	4.17±0.16	88.68±1.04	89.61±8.94

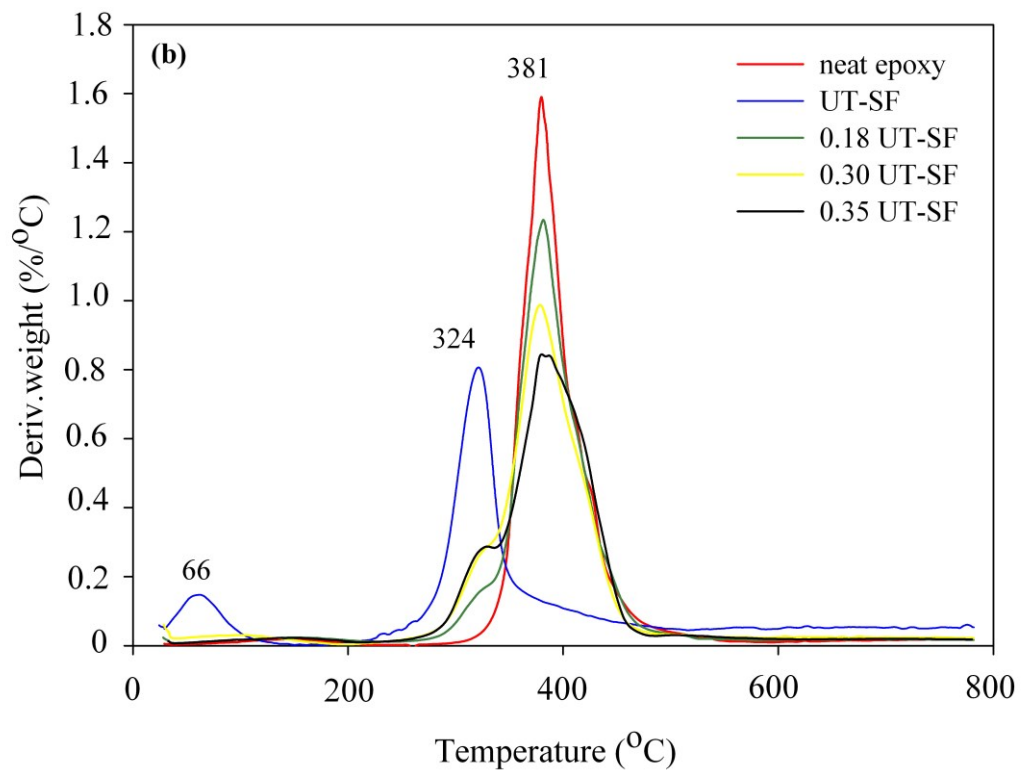
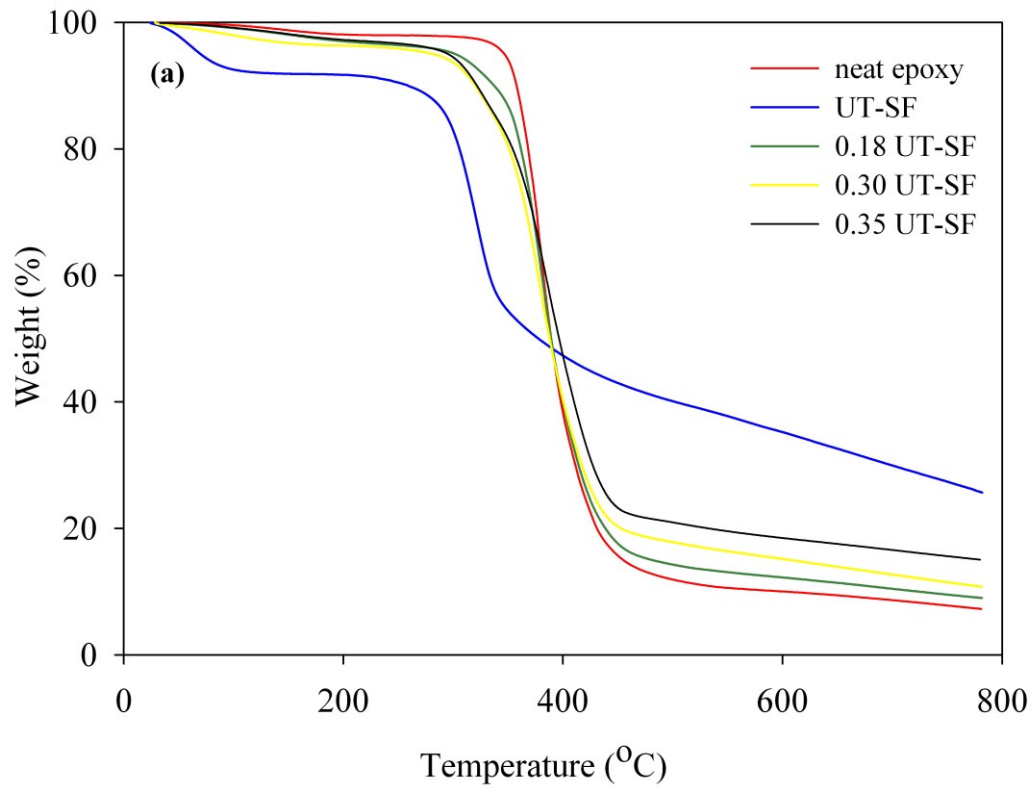


3.3.2 สมบัติทางความร้อนของอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผิผ้าไหม

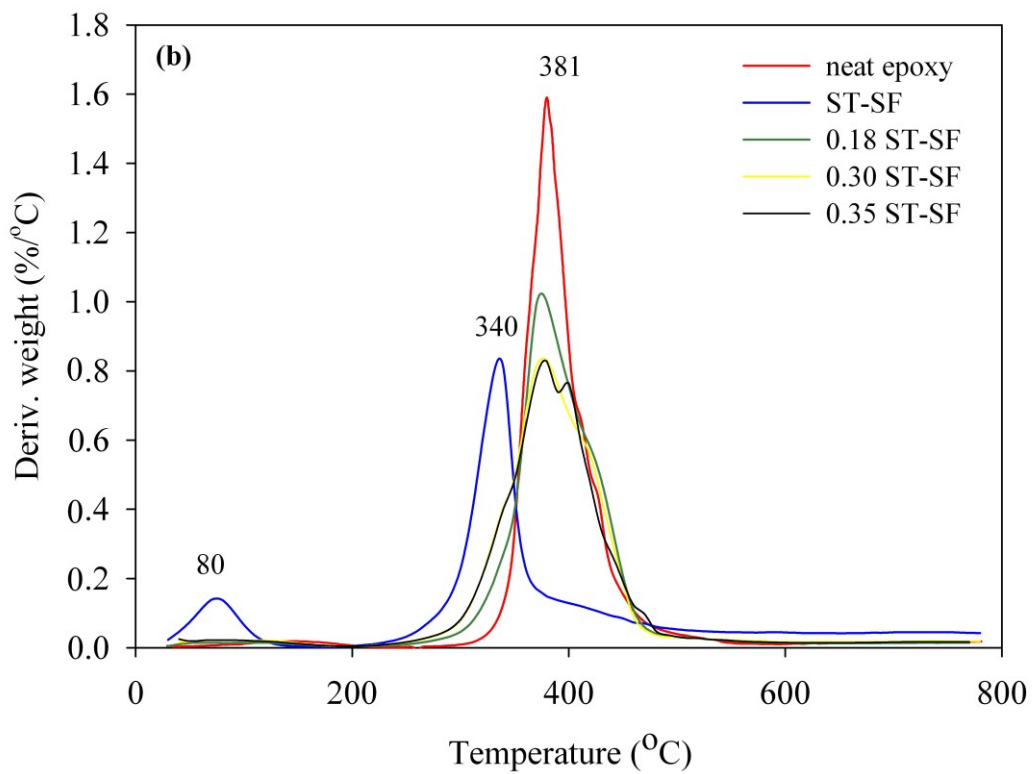
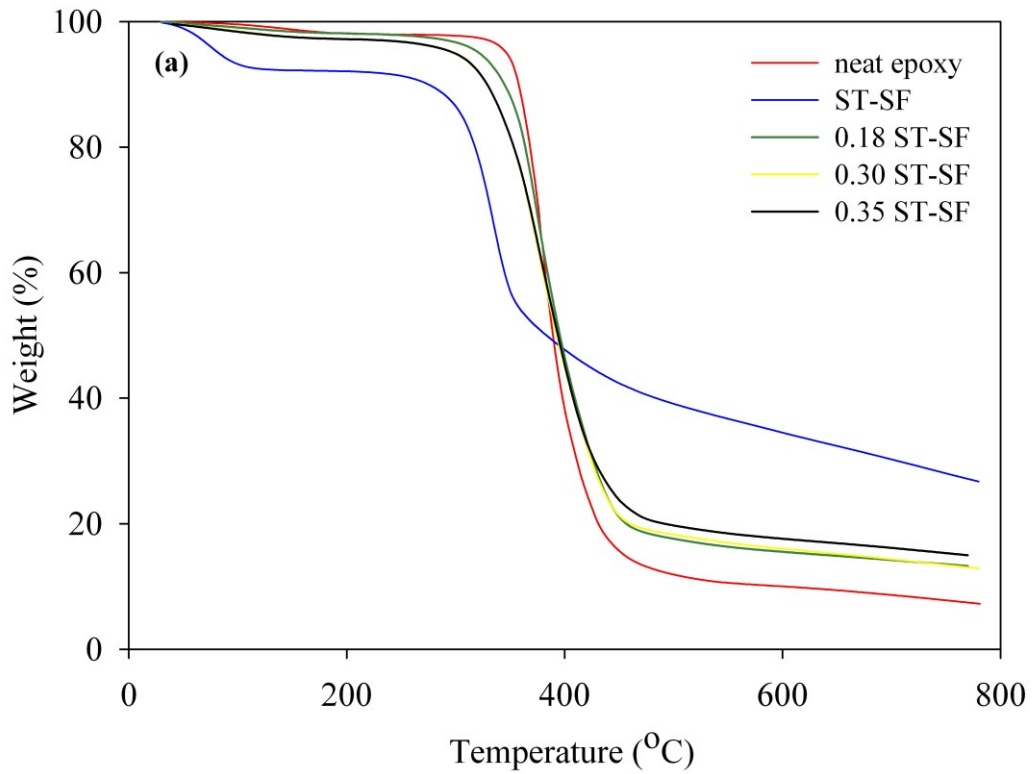
กราฟ TGA และ DTGA จากการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน ของผิผ้าไหมแบบ UT-SF, อีพอกซี และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผิผ้าไหมแบบ UT-SF แสดงในรูปที่ 3.7 จากกราฟ TGA และ DTGA ของผิผ้าไหมแบบ UT-SF แสดงให้เห็นว่ามีการเกิดทรานซิชันเนื่องจากความร้อน (thermal transition) 2 ช่วง ระหว่างอุณหภูมิ 30-800 องศาเซลเซียส อุณหภูมิทรานซิชันที่ 1 (the first transition temperature) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากการระเหยออกของความชื้นที่อยู่ในผิผ้าไหม อุณหภูมิทรานซิชันที่ 2 (the second transition temperature) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 324 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเสื่อมสลายของผิผ้าไหมแบบ UT-SF [4] และจากกราฟ TGA และ DTGA ของอีพอกซีแสดงให้เห็นอุณหภูมิการเสื่อมสลายของอีพอกซีที่ 381 องศาเซลเซียส สำหรับกราฟ TGA และ DTGA ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผิผ้าไหมแบบ UT-SF แสดงการเกิดทรานซิชันเนื่องจากความร้อน (thermal transition) 3 ช่วง อุณหภูมิทรานซิชันที่ 1 เกิดจากการระเหยออกของความชื้นของวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิระหว่าง 60-210 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิทรานซิชันที่ 2 เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 220-340 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเสื่อมสลายไปของผิผ้าไหม UT-SF อย่างไรก็ตามที่สัดส่วนโดยมวลของผิผ้า UT-SF ที่ 0.30 และ 0.35 การเสื่อมสลายในช่วงนี้จะสังเกตเห็นเป็นเพียงไหล่พิค (shoulder peak) ของเส้นกราฟ DTGA เท่านั้นสำหรับสัดส่วนโดยมวลของผิผ้า UT-SF ที่ 0.18 ทรานซิชันนี้ยากที่จะสังเกตเห็นเนื่องจากพิคส่วนนี้รวมเข้ากับพิคของการเสื่อมสลายของอีพอกซี การเสื่อมสลายของอีพอกซีเกิดขึ้นที่อุณหภูมิทรานซิชันที่ 3 (the third transition temperature) ในช่วง 350-450 องศาเซลเซียส โดยตำแหน่งของพิคปรากฏที่ 381 องศาเซลเซียส

กราฟ TGA และ DTGA ของ ผิผ้าไหมแบบ ST-SF, อีพอกซี และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผิผ้าไหมแบบ ST-SF แสดงในรูปที่ 3.8 กราฟ TGA และ DTGA ของผิผ้าไหมแบบ ST-SF แสดงให้เห็นว่ามีแสดงให้เห็นว่ามีการเกิดทรานซิชันเนื่องจากความร้อน (thermal transition) 2 ช่วง อุณหภูมิทรานซิชันที่ 1 เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากการระเหยออกของความชื้นที่อยู่ในผิผ้าไหม อุณหภูมิทรานซิชันที่ 2 เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 340 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเสื่อมสลายของผิผ้าไหมแบบ ST-SF กราฟ TGA และ DTGA ของอีพอกซีแสดงให้เห็นอุณหภูมิทรานซิชันที่อุณหภูมิ 381 องศาเซลเซียส [5] เนื่องมาจากการเสื่อมสลายของอีพอกซีนั่นเอง สำหรับกราฟ TGA และ DTGA ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผิผ้าไหมแบบ ST-SF แสดงอุณหภูมิทรานซิชันที่ 1 จากการระเหยออกของความชื้นของวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิระหว่าง 70-190 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิทรานซิชันที่ 2 ในช่วง 220-350 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเสื่อมสลายของผิผ้าไหม ST-SF สำหรับอุณหภูมิทรานซิชันที่ 3 อยู่ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 350-450 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเสื่อมสลายของอีพอกซีเมทริกซ์ของวัสดุเชิงประกอบตำแหน่งของพิคโดยประมาณอยู่ที่ 381 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 3.7 และ 3.8 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิทรานซิชันที่ 2 ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยผิผ้าไหมแบบ ST-SF สูงกว่าของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยผิผ้าไหมแบบ UT-SF แต่อุณหภูมิทรานซิชันที่ 3 ซึ่งเป็นการเสื่อมสลายของอีพอกซีเมทริกซ์ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผิผ้าไหมต่างชนิดไม่ได้แตกต่างกัน การดัดแปรผิผ้าไหมด้วยสารคู่ควบ APTES ทำให้อุณหภูมิการเสื่อมสลายเนื่องจากความร้อนของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีสูงขึ้น



รูปที่ 3.7 กราฟ TGA (a) และ DTGA (b) ของพีน้าไหมแบบ UT-SF, อีพอกซี และวัสดุเชิงประกอบ อีพอกซีเสริมแรงด้วยพีน้าไหมแบบ UT-SF



รูปที่ 3.8 กราฟ TGA (a) และ DTGA (b) ของ UT-SF, อีพอกซี และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF

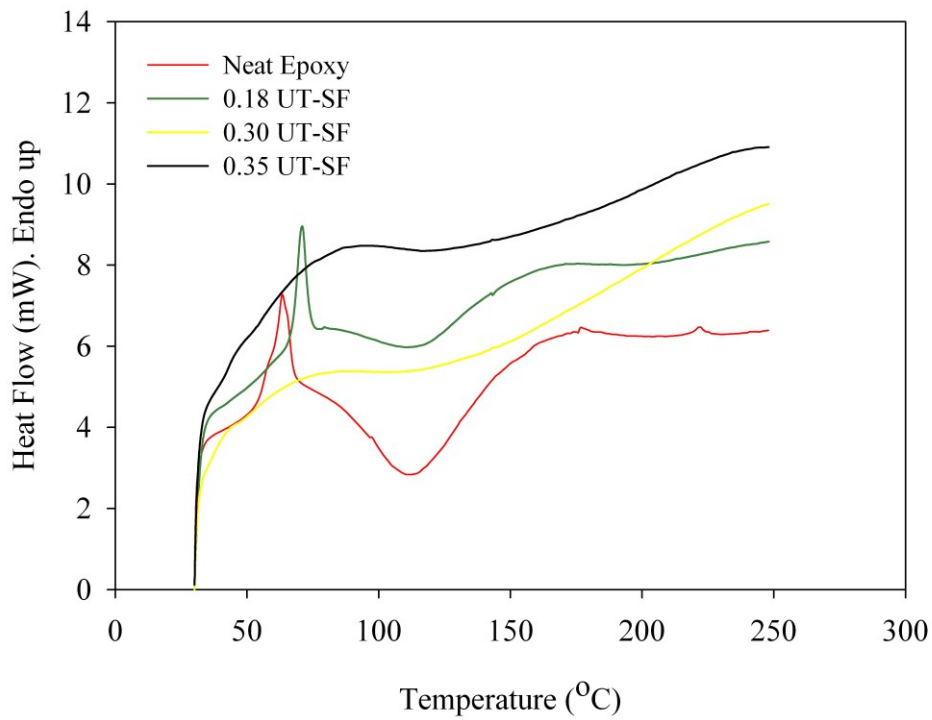
กราฟ DSC thermogram จากการวิเคราะห์พลังงานภายใต้ความร้อนของอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF ก่อนและหลังการอบบ่ม (post cured) แสดงในรูปที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ และ กราฟ DSC thermogram ของ อีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ ST-SF ก่อนและหลังการอบบ่มแสดง แสดงในรูปที่ 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ อุณหภูมิการเกิดโครงสร้างร่างแห (curing temperature, T_{cure}) ก่อนการอบบ่มและ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (glass transition temperature, T_g) หลังการอบบ่มของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซี แสดงในตารางที่ 3.2

สำหรับอุณหภูมิการเกิดโครงสร้างร่างแห (T_{cure}) ของอีพอกซีต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF และ ST-SF และ T_{cure} ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF และ ST-SF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนโดยมวลของเส้นใยไหมมีเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณเส้นใยไหมเพิ่มขึ้นอีพอกซีเรซินและสารทำให้เกิดโครงสร้างร่างแห (curing agent) ถูกจำกัดอยู่ระหว่างชั้นของเส้นใยไหม และบางส่วนอาจถูกดูดซับด้วยเส้นใยไหมจึงทำให้อุณหภูมิการเกิดโครงสร้างร่างแหสูงขึ้น สำหรับวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF มีค่า T_{cure} สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ ST-SF เพียงเล็กน้อย

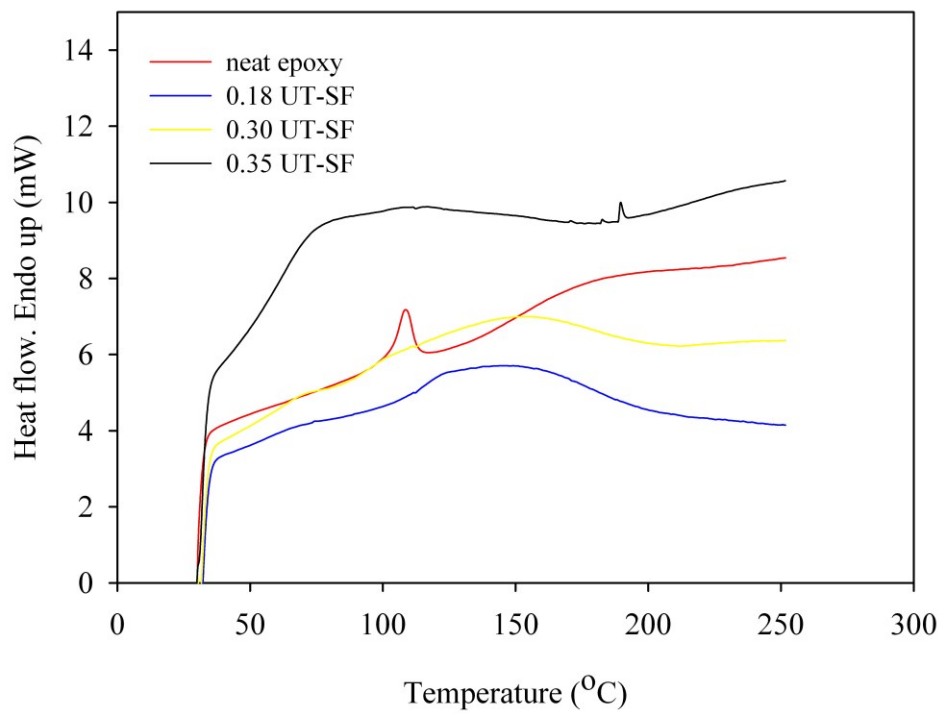
จากตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (T_g) หลังอบบ่มของอีพอกซีสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF โดยที่ค่า T_g ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม ลดลงเมื่อสัดส่วนโดยมวลของเส้นใยไหมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม T_g ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ ST-SF ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 3.2 อุณหภูมิการเกิดโครงสร้างร่างแห (T_{cure}) และ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (T_g) ของอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF และ แบบ ST-SF

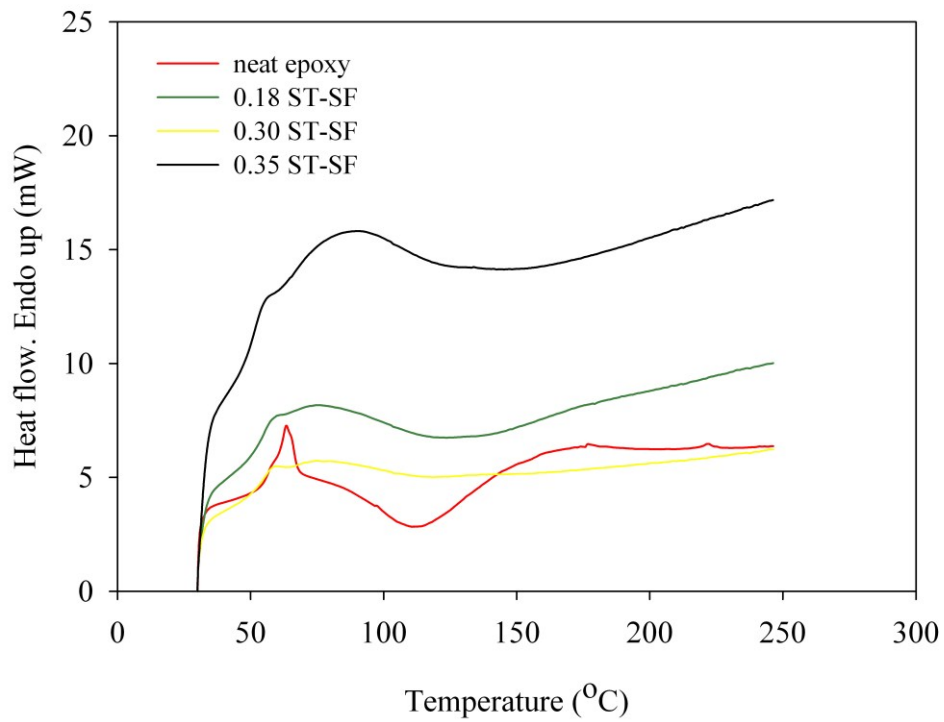
สัดส่วนน้ำหนัก เส้นใยไหม	อุณหภูมิการเกิดโครงสร้างร่างแห (°C)		อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (°C)	
	UT-SF/Epoxy	ST-SF/Epoxy	UT-SF/Epoxy	ST-SF/Epoxy
0.00	105.4	105.4	113.7	113.7
0.18	116.7	114.8	113.5	107.0
0.30	138.0	115.5	101.8	101.2
0.35	154.0	147.6	101.3	98.1



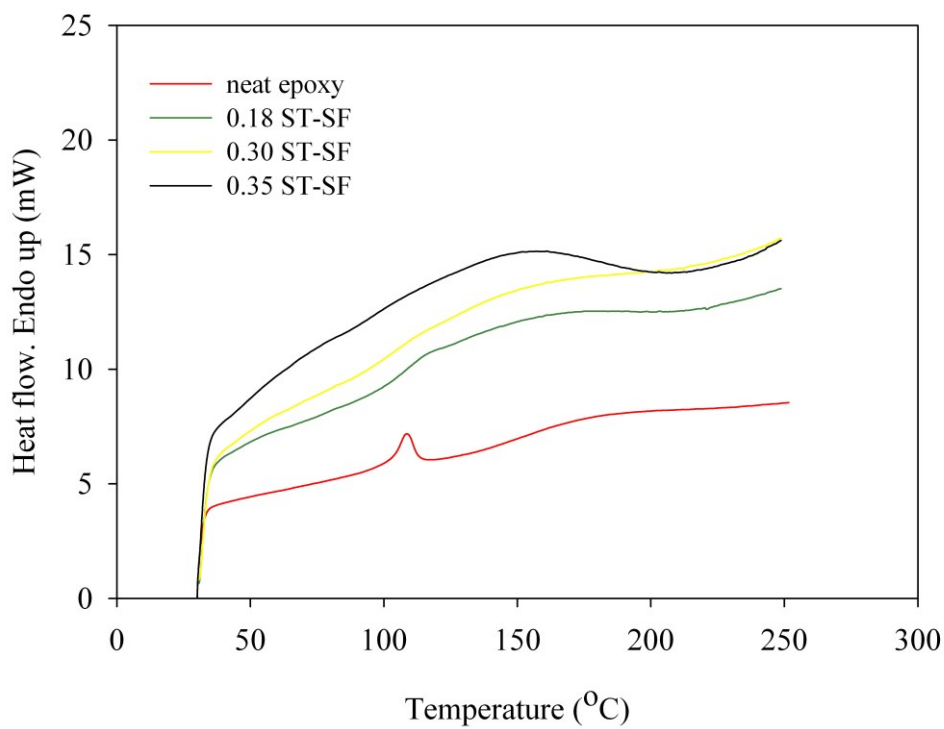
รูปที่ 3.9 กราฟ DSC thermogram ของ อีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF ก่อนการอบบ่ม



รูปที่ 3.10 กราฟ DSC thermogram ของ อีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF ที่ผ่านการอบบ่ม



รูปที่ 3.11 กราฟ DSC ของ อีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ ST-SF ก่อนการอบบ่ม



รูปที่ 3.12 กราฟ DSC ของ อีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ ST-SF ที่ผ่านการอบบ่ม

3.3.3 สันฐานวิทยาของอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม

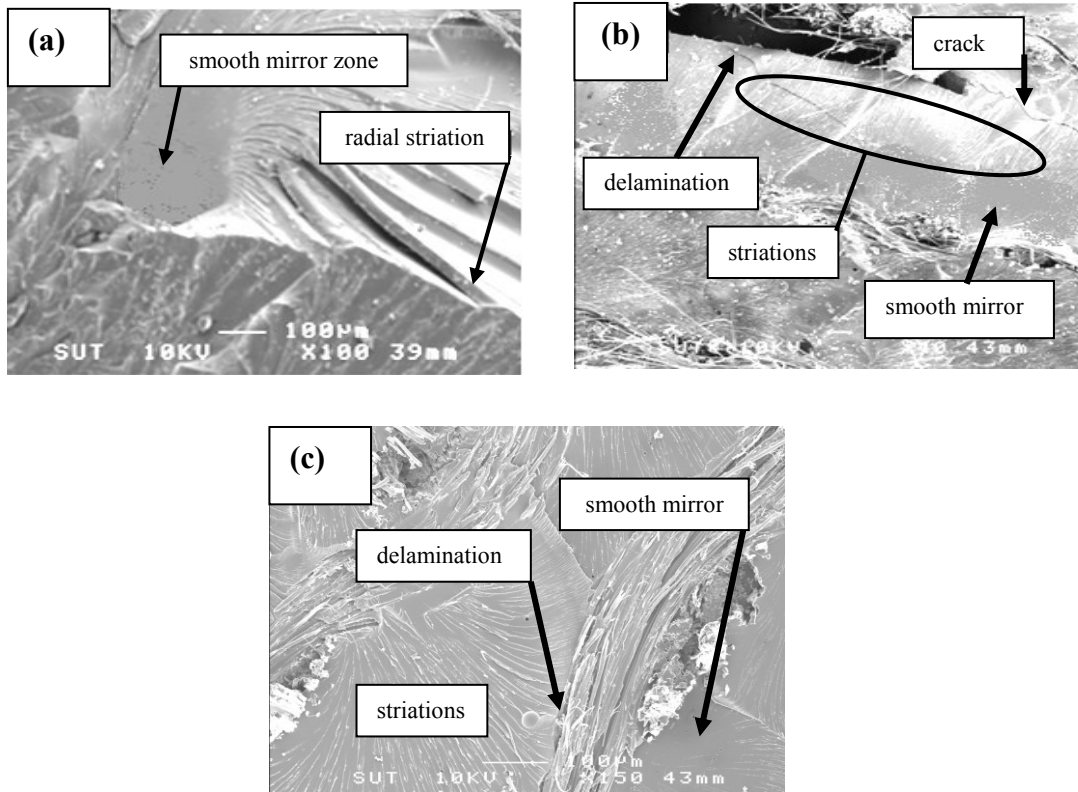
3.3.3.1 พื้นผิวแตกหัก (Fracture Surface)

SEM micrograph ของพื้นผิวแตกหักของชิ้นทดสอบความทนต่อแรงดัดของอีพอกซีและวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF แสดงในรูปที่ 3.13 พื้นผิวแตกหักของอีพอกซีแสดงลักษณะจำเพาะของการแตกหักแบบเปราะ (brittle fracture) ซึ่งแสดงให้เห็นโซนกระจก (mirror zone) และส่วนที่ใกล้กับโซนกระจกจะมีส่วนของการเกิดเป็นริ้วในแนวรัศมี (radial striation) [6, 7] ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (a)

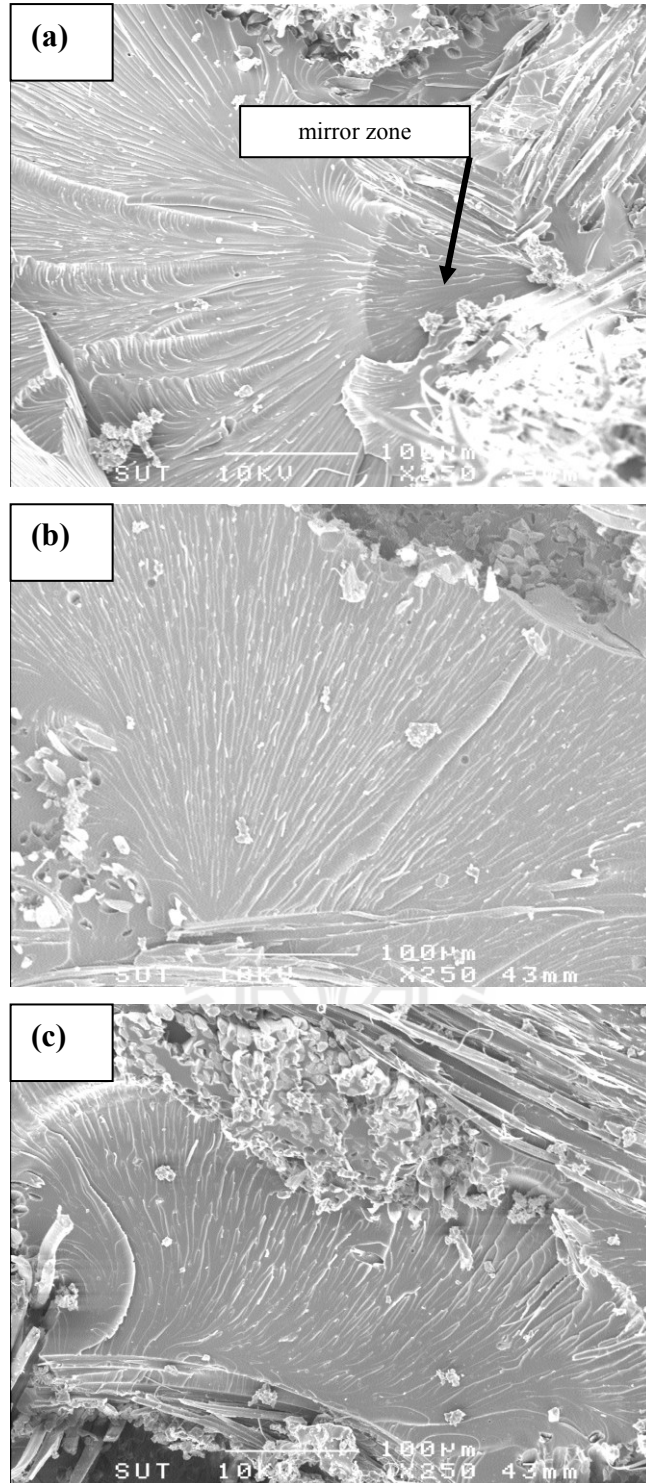
สำหรับวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF ที่สัดส่วนเส้นใยไหม 0.15 นั้น จะสังเกตเห็นส่วนของโซนกระจกและส่วนของการเกิดเป็นริ้วในแนวรัศมี (radial striation) จากขอบเส้นใยไหมชั้นหนึ่งไปยังชั้นถัดไป และมี delamination เกิดขึ้น และสามารถสังเกตเห็นการแผ่ขยายของรอยแตก (crack propagation) ตามแนวของเส้นใยไหม ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (b) อย่างไรก็ตามที่สัดส่วนของ UT-SF 0.15 นี้วัสดุเชิงประกอบแสดงพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะ

ในวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF ที่สัดส่วนเส้นใยไหม 0.30 ลักษณะการแตกหักที่มีส่วนของการเกิดเป็นริ้วในแนวรัศมี (radial striation) ที่แผ่ขยายจากเส้นใยไหมชั้นหนึ่งไปยังอีกชั้นถัดไป เกิดขึ้นเช่นเดียวกัน มีการเกิด delamination เล็กน้อย อีกทั้งยังไม่สังเกตเห็นรอยแตก (crack) เกิดขึ้นที่ส่วนของอีพอกซีเมทริกซ์ ดังแสดงให้เห็นอยู่ในรูป 3.13 (c) อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ตามที่สัดส่วนของ UT-SF 0.30 นี้วัสดุเชิงประกอบยังมีพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะ

จาก SEM micrograph ในรูปที่ 3.14 ของพื้นผิวแตกหักของชิ้นทดสอบความทนต่อแรงดัดของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ ST-SF แสดงให้เห็นพื้นผิวแตกหักที่เกิดเป็นริ้วในแนวรัศมี (radial striation) จากชั้นเส้นใยไหมหนึ่งไปยังเส้นใยไหมอีกชั้นหนึ่งเช่นเดียวกับที่สังเกตในวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF ทั้งนี้ภาพยังแสดงส่วนของโซนกระจก ซึ่งขนาดโซนกระจกลดลงเมื่อสัดส่วนโดยมวลของ ST-SF เพิ่มขึ้น



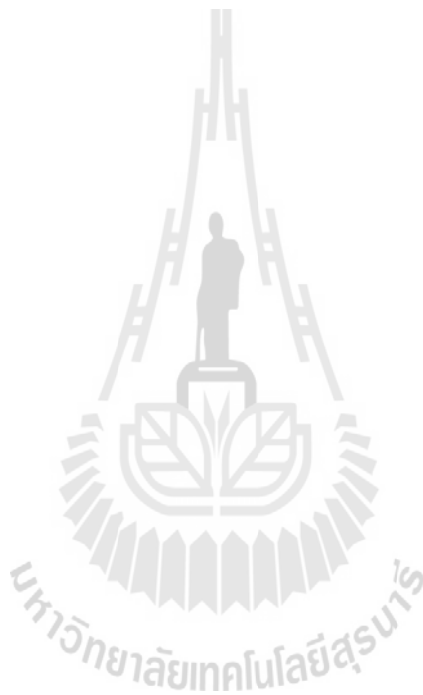
รูปที่ 3.13 SEM micrographs ของอีพอกซี (a) และวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ UT-SF ที่สัดส่วนโดยน้ำหนัก UT-SF 0.18 (b) และ 0.30 (c) จากชั้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความทนต่อแรงดัด

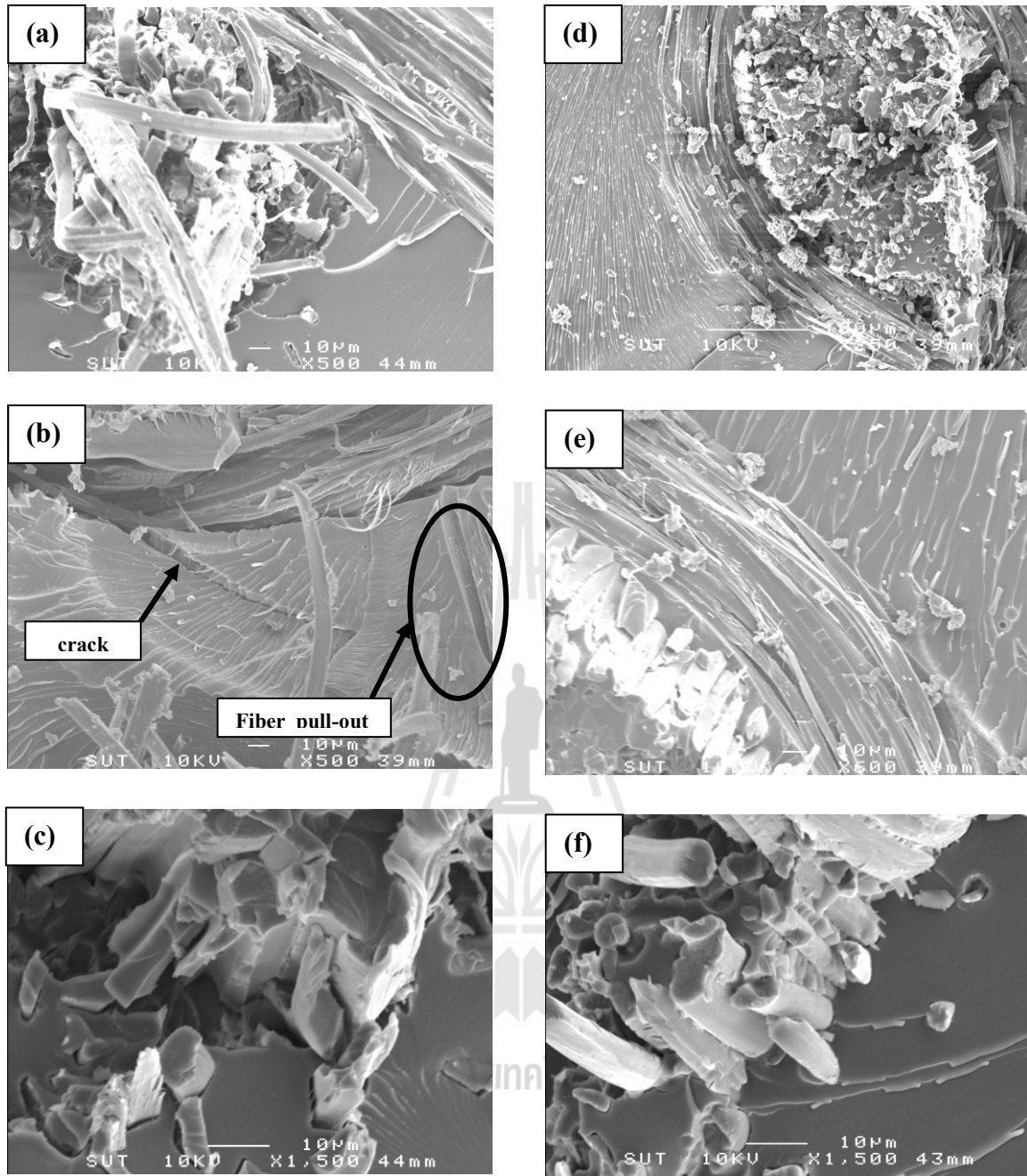


รูปที่ 3.14 SEM micrographs ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไหมแบบ ST-SF ที่ สกัดส่วนโดยน้ำหนัก ST-SF 0.18 (a), 0.30 (b) และ ST-SF 0.35 (c)

3.3.3.2 การยึดติดระหว่างพื้นผิวของผิวน้ำใหม่และอีพอกซีเมทริกซ์

จาก SEM micrograph แสดงในรูปที่ 3.15 ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผิวน้ำใหม่แบบ UT-SF และ ผิวน้ำใหม่แบบ ST-SF แสดงให้เห็นว่าการยึดติดระหว่างอีพอกซีและพื้นผิวผิวน้ำใหม่แบบ UT-SF ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีไม่ดัดนัก มีช่องว่างกระจายอยู่โดยพื้นผิวสัมผัสระหว่างอีพอกซีเมทริกซ์และผิวน้ำใหม่ และบางส่วนยังมีลักษณะของการเกิด delamination และรอยแตกของอีพอกซีเมทริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 (a,b,c) สำหรับวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีจากผิวน้ำใหม่แบบ ST-SF ช่องว่างระหว่างพื้นผิวสัมผัสของอีพอกซีเมทริกซ์และผิวน้ำใหม่ลดน้อยลง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.15 (d,e,f) ส่งผลต่อการปรับปรุงความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยผิวน้ำใหม่แบบ ST-SF





รูปที่ 3.15 SEM micrographs ของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นผ้าไหม UT-SF ที่สัดส่วนโดยน้ำหนัก 0.18 (a, b, c) และ วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นผ้าไหม ST-SF ที่สัดส่วนโดยน้ำหนัก 0.18 (d,e,f)

3.4 สรุปผลการศึกษา

1. การเสริมแรงอีพอกซีเรซินด้วยผิวน้ำใหม่ทำให้มอดูลัสของยังก์และมอดูลัสแรงดัดของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผิวน้ำใหม่
2. การเสริมแรงอีพอกซีเรซินด้วยผิวน้ำใหม่ทำให้ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงดัด และความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีน้อยกว่าของอีพอกซี อย่างไรก็ตาม ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงดัด และความทนต่อแรงกระแทก จะเพิ่มตามปริมาณผิวน้ำใหม่ที่เพิ่มขึ้น
3. อุณหภูมิการเสื่อมสลายเนื่องจากความร้อนของอีพอกซีเมทริกซ์ไม่ขึ้นกับปริมาณผิวน้ำใหม่แต่วัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยผิวน้ำใหม่จะเริ่มเสื่อมสลายที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเสื่อมสลายของอีพอกซี (neat epoxy)
4. อุณหภูมิการเกิดโครงสร้างร่างแหของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีเพิ่มขึ้นแต่อุณหภูมิเกิดการทรานซิสชันแก้วหลังอบบ่มลดลงเมื่อปริมาณผิวน้ำใหม่เพิ่มขึ้น
5. การดัดแปรผิวน้ำใหม่ด้วยสารคู่ควบ APTES มีผลต่อการปรับปรุงความทนต่อแรงดึง และความทนต่อแรงกระแทกเล็กน้อย
6. การดัดแปรผิวน้ำใหม่ด้วยสารคู่ควบ APTES มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเริ่มต้นของการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของวัสดุเชิงประกอบอีพอกซีอย่างมีนัยสำคัญ
7. การดัดแปรผิวน้ำใหม่ด้วยสารคู่ควบ APTES มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิการเกิดโครงสร้างร่างแห



เอกสารอ้างอิง

1. S. Davarpanah, N.M. Mahmoodi, M. Arami, H. Bahrami, and F. Mazaheri, *Appl. Surf. Sci.*, **255**: 4171-4176. 2009
2. G. Li, H. Liu, H. Zhao, Y. Gao, J. Wang, H. Jiang, and R.I. Boughton, *J. Coll. Interf. Sci.*, **358**: 307-315. 2011.
3. J. Perez-Rigueiro, C. Viney, J. Llorca, and M. Elices, *J. Appl. Polym. Sci.*. **70**: 2439-2447. 1998.
4. S.M. Lee, D. Cjp, W.H. Park, S.G. Lee, S.O. Han, and L. T. Drzal, *Comp. Sci. Tech.*. **65**: 647-657. 2005.
5. H. Lee and K. Neville, *Handbook of Epoxy Resins*, McGraw-Hill, New York, 1982.
6. R. Zhao and W. Lao, *Mater. Sci. Eng., A*, **483-484**: 313-315. 2008.
- 7 J.R.M. d'Almeida, G. W. de Menezes, and S.N. Monteiro, *Polym. Adv. Tech.*, **9**: 216-221. 1998.



ประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

นางวิมลลักษณ์ สุตะพันธ์ ดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา จบการศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ. 2532 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2536 และ จบการศึกษาระดับปริญญาเอกสาขา Macromolecular Science จาก Case Western Reserve University มลรัฐโอไฮโอ ประเทศสหรัฐอเมริกา พ.ศ. 2543 สาขาวิชาการที่มีความสนใจ สเปกโทรสโกปีของพอลิเมอร์ (spectroscopy of polymers) และ คอมโพสิทอินเทอร์เฟซ (composite interface/interphase) ผลงานทางวิชาการ ประกอบด้วย บทความทางวิชาการ 31 บทความ และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 6 ฉบับ

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาวนิธินาถ ศุภกาญจน์ ดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา จบการศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2536 จบการศึกษาระดับปริญญาเอกสาขา Macromolecular Science จาก Case Western Reserve University มลรัฐโอไฮโอ ประเทศสหรัฐอเมริกา มีความชำนาญพิเศษในสาขา Polymer Characterization และ Polymer Composites มีผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารระดับนานาชาติ ผลงานทางวิชาการ ประกอบด้วย บทความทางวิชาการ 31 บทความ และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 6 ฉบับ

ผู้ร่วมวิจัย

นางยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์ ดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา จบการศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วัสดุศาสตร์) เกียรตินิยมอันดับสอง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2536 และ จบการศึกษาระดับปริญญาเอกสาขา Polymer Engineering จาก University of Akron มลรัฐโอไฮโอ ประเทศสหรัฐอเมริกา พ.ศ. 2542 สาขาวิชาการที่มีความสนใจ กระบวนการขึ้นรูปและตรวจสอบพอลิเมอร์ (polymer processing and characterization) และพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิท (polymer blends and composites) ผลงานทางวิชาการ ประกอบด้วย บทความทางวิชาการ 31 บทความ และ รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 5 ฉบับ

ผลงานเผยแพร่ของโครงการวิจัย

1. N. Chaisomkun, N. Suppakarn, and W. Sutapun, *Study of B. Mori Silk Fabric and B. Mori Silk Reinforced Epoxy Composite*, **Advanced Materials Research**, 410 (2012), 329-332.
2. W. Chaisomkul, N. Suppakarn, and W. Sutapun, *Silk Fabric as Composite Reinforcement: A Preliminary Study*, **The 2nd Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology**, April 26-27, 2011, Bangkok Thailand.
3. N. Chaisomkul, N. Suppakarn, and W. Sutapun, *Mechanical Properties and Morphology of Epoxy Composite Reinforced by Silk Fabric*, **Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2011)**, Bangkok Thailand P415.

